



Abschlussbericht

***Verbundvorhaben:
Energiepflanzen für die Biogasproduktion***

***Teilvorhaben 2:
Optimierung der Verfahrenskette der Bereitstellung
und Nutzung von Energiepflanzen zur Kofermentation
im Biogasreaktor***

Gefördert von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

FKZ: 22020903

Themenblatt-Nr.: 42.22.430

Langtitel: **Optimierung der Verfahrenskette der Bereitstellung und Nutzung von Energiepflanzen zur Kofermentation im Biogasreaktor**

Kurztitel: Biogas

Projekt: Öl-, Energie- und Industriepflanzen

Projektleiter: Dr. habil. Armin Vetter

Laufzeit: 06/2004 bis 05/2007

Auftraggeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

Namen der Bearbeiter: Dipl. Ing. (FH) Michael Conrad
Dipl. Ing. agr. Andrea Biertümpfel

Jena, im Dezember 2007

(Peter Ritschel)
Amt. Präsident

(Dr. habil. Armin Vetter)
Projektleiter

Inhalt

| | Seite |
|--|-------|
| 1 Einleitung | 4 |
| 2 Material und Methoden | 5 |
| 2.1 Versuchsstandorte/Pflanzenarten | 5 |
| 2.2 Mehrortiger Anbauvergleich Energiepflanzen | 5 |
| 2.2.1 Kurzcharakteristik der angebauten Pflanzenarten | 6 |
| 2.3 Verarbeitungsversuche | 8 |
| 2.3.1 Silierversuche | 8 |
| 2.3.2 Minibatchversuche | 8 |
| 2.3.3 Batchversuche | 9 |
| 2.3.4 Kontinuierliche Versuche | 9 |
| 2.4 Theoretisch mögliche Gasausbeute | 10 |
| 2.5 Weiterführende anbautechnische Versuche | 10 |
| 2.6 Herbizidversuche | 11 |
| 3 Ergebnisse | 11 |
| 3.1 Mehrortiger Anbauvergleich Energiepflanzen | 11 |
| 3.1.1 Versuchsstandort Dornburg | 11 |
| 3.1.1.1 Theoretisch mögliche Gasausbeuten in getrocknetem Pflanzenmaterial und Silage | 11 |
| 3.1.1.2 Gasausbeuten der Minibatchversuche | 19 |
| 3.1.1.3 Gasausbeuten der Batchversuche | 21 |
| 3.1.1.4 Gasausbeuten der kontinuierlichen Versuche | 31 |
| 3.1.2 Versuchsstandort Heßberg | 37 |
| 3.1.3 Versuchsstandort Müllheim | 41 |
| 3.1.4 Versuchsstandort Burkersdorf | 45 |
| 3.1.5 Standorteignung der Pflanzenarten | 48 |
| 3.2 Versuche zur Zweikulturnutzung | 51 |
| 3.2.1 Versuchsstandort Dornburg | 51 |
| 3.2.2 Versuchsstandort Heßberg | 53 |
| 3.2.3 Versuchsstandort Kirchengel | 55 |
| 3.3 Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras | 57 |
| 3.4 Herbizidversuche | 62 |
| 4 Ökonomische Betrachtung | 65 |
| 5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung | 70 |
| 6 Literatur | 72 |

1 Einleitung

Durch die sich ändernden Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel dem Inkrafttreten und der Umsetzung des Erneuerbaren Energiengesetzes sowie dem Ziel der ständigen Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien an der Primärenergie, gewinnt die Produktion und Nutzung von Biogas zunehmend an Bedeutung im ländlichen Raum. Sichtbar wird dies an der ständig wachsenden Zahl von wirtschaftlich arbeitenden Biogasanlagen in der Landwirtschaft.

Mit der verstärkten Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Energiegewinnung werden nicht nur Möglichkeiten für den Abbau von Überproduktionen aufgezeigt, sondern auch neue Märkte und Arbeitsplätze für die Landwirtschaft erschlossen.

Neben dem sich immer mehr verringern den tierhaltungsbedingten Potenzial an Gülle, Mist und Einstreu kommen zunehmend landwirtschaftliche Kofermente zur Erhöhung der Biogas- und Methanausbeute zum Einsatz. Durch die Verwendung geeigneter landwirtschaftlicher Kulturen, die als Koferment in Biogasanlagen prozentual Gülle ersetzen, wird eine Verdoppelung bis Verdreifachung der Methanausbeute im Vergleich zur reinen tierhaltungsbedingten Vergärung des Gülleanfalls angestrebt.

Pflanzenarten, die für den Einsatz als Koferment geeignet erscheinen, sind solche, die vorrangig einen hohen Biomasseertrag erreichen, deren Rohfett- und Rohproteinanteil hoch und der Anteil an Rohfasern gering ist. Untersucht wurden bisher konventionelle Pflanzenarten, wie Mais, Rüben, Getreide sowie unterschiedliche Grasarten und -sorten auf ihre Eignung als Koferment. Eines der wichtigsten Kosubstrate ist der Mais. Begründet ist dies durch die Tatsache, dass bei der Verwendung von Mais, bezogen auf die organische Trockensubstanz (oTS), geringe Produktionskosten im Anbau sowie bei der Silierung anfallen und die Technologie vom Anbau bis hin zur Silierung sicher ist. Eine gute Silierbarkeit des Pflanzenmaterials und die dadurch bedingte ständige Verfügbarkeit ist eine der Grundvoraussetzungen für den technologisch stabilen Betrieb einer Biogasanlage über das gesamte Wirtschaftsjahr. Der Einsatz von Maissilage und auch Getreide als Koferment muss aber in Anbetracht der ständig steigenden Anzahl von Biogasanlagen aus fruchtfolgetechnischen Gründen kritisch betrachtet werden. Hinzu kommen anbautechnische Aspekte, beispielsweise Zweitfruchtsysteme.

Arbeiten zur Eruierung weiterer Pflanzenarten, wie z. B. Topinambur oder Sudangras, beschränkten sich bisher vorwiegend auf die Untersuchung einzelner Verfahrensschritte, wie die Durchführung von Batchversuchen, ohne das ganzheitliche Verfahren von der Gewinnung der Biomasse bis hin zur Methanausbeute zu betrachten.

Inhalt des Projektes war die Untersuchung der Prozesskette vom Anbau verschiedener Energiepflanzen, über die Prüfung geeigneter Erntesysteme, die sichere Silierung bis hin zur Bestimmung und Messung der Biogas- und Methanausbeuten in Minibatch-, Batch- bzw. kontinuierlichen Gärversuchen unter einheitlichen Kriterien. Als hinsichtlich ihrer technologischen Eigenschaften und Inhaltsstoffe geeignete Pflanzen sind Zuckerhirse, Sudangras, Topinambur (Kraut und Knolle), Klee gras, Luzernegras und Durchwachsene Silphie untersucht und mit zwei Maissorten verglichen worden.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandorte/Pflanzenarten

Zur Durchführung der Anbauversuche mit den im Rahmen des Forschungsprojektes zu prüfenden Pflanzenarten wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Versuchsstandorte mit ihrer typischen Spezifizierung gewählt.

Tabelle 1: Versuchsstandorte

| Standort | Bodenform | Bodenart | Ackerzahl | Höhenlage (m) | Temperatur (°C) | Niederschlag (mm) |
|--------------------------|--------------------|-----------------------|-----------|---------------|-----------------|-------------------|
| Heßberg (Vorgebirge) | Bergton-Staugley | Lehm-Ton | 43 | 380 | 7,1 | 760 |
| Dornburg (Ackerebene) | Löss-Parabraunerde | Stark toniger Schluff | 46 - 80 | 260 | 8,1 | 578 |
| Müllheim (Rheinebene) | Parabraunerde | Lehm | 80 | 232 | 9,5 | 630 |
| Burkersdorf (Vorgebirge) | Berglehm-Braunerde | Sandiger Lehm | 36 | 440 | 7,0 | 642 |
| Kirchengel (Ackerebene) | Löss-Rendzina | Lehm | 60 - 65 | 305 | 7,8 | 568 |

Die in den einzelnen Versuchsstationen geprüften Pflanzenarten beinhaltet Tabelle 2. Die Auswahl der Pflanzenarten für den jeweiligen Standort richtete sich dabei nach ihren Ansprüchen an Boden und Klima und den Gegebenheiten der Versuchsstandorte.

Tabelle 2: Versuchsstandorte/Pflanzenarten

| Pflanzenarten | Versuchsstandorte (ab 2004) | | | |
|---------------------------|-----------------------------|---------|----------|-----------------------|
| | Dornburg | Heßberg | Müllheim | Burkersdorf (ab 2005) |
| Luzernegras | X | | | X |
| Kleegras | | X | X | |
| Topinambur einjährig | X | | | X |
| Topinambur mehrjährig | X | X | X | |
| Zuckerhirse Rona | X | | | |
| Zuckerhirse Friggo | X | | X | X |
| Zuckerhirse Super Sile 15 | X | | | |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | X | | X | X |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | X | | X | X |
| Hirse Goliath | X | | | |
| Sudangras SUSU | X | X | X | X |
| Mais Doge | X | X | X | X |
| Mais PR38F53 | X | X | X | X |
| Durchwachsene Silphie | X | X | | |

2.2 Mehrortiger Anbauvergleich Energiepflanzen

Im Rahmen des Projektes kamen die in Tabelle 2 genannten Pflanzenarten an vier Standorten zur Prüfung. Die Ernte der Pflanzen erfolgte in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium sowie dem Trockensubstanzgehalt (TS) der einzelnen Arten zu zwei bis drei terminlich versetzten Schnittzeitpunkten.

Aus allen Versuchen wurden Proben zur Bestimmung von TS und der organischen Trockensubstanz (oTS) sowie zur Untersuchung der Gehalte an den organischen Inhaltsstoffen Rohprotein, Rohfett und Rohfaser entnommen. Die stickstofffreien Extraktstoffe sind berechnet worden.

Zur Silierung kamen die in der Versuchsstation Dornburg der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) angebauten Pflanzenarten. Nach einer Silierdauer von neunzig Tagen wurden die Silagen in das Verfahrenstechnische Institut Saalfeld (VTI) zur Durchführung von Minibatch-, Batch- und kontinuierlichen Versuchen gegeben. Die Analyse der Silagen auf die o. g. Parameter schloss sich an.

2.2.1 Kurzcharakteristik der angebauten Pflanzenarten

Mais

Neben dem Einsatz von Maissilage in der Milchviehhaltung, wo sie einen erheblichen Teil des Winterfutterbedarfes deckt, wird diese auch vorzugsweise als Koferment in Biogasanlagen eingesetzt. Im Siliererfolg übertrifft Mais auf Grund seiner positiven Nährstoffzusammensetzung andere Silagearten, wie Rübenblatt, Rübenschnitzel, Gras- oder Roggensilage. Die Herstellungskosten von Maissilage bewegen sich auf einem ähnlichen Niveau wie die der Ganzpflanzengetreidesilagen.

Um einen direkten Vergleich zu den weiteren im Thema bearbeitenden Pflanzenarten ziehen zu können, waren die Energiemaissorte „Doge“ und der Silomais „PR38F53“ für Referenzaussagen im Versuchsanbau integriert. Des Weiteren kamen in einem Zweitfruchtversuch die Maissorten „Maibi“ und „Constantino“ zum Anbau.

Sudangras

Als Sorghumhirse stammt das Sudangras ursprünglich aus Afrika, wo es nur noch vereinzelt als Futterpflanze angebaut wird. Aus der Wildart wurde in relativ kurzer Zeit in den USA eine der wichtigsten Futterpflanzen gezüchtet.

Sudangras wächst auf nahezu allen Böden und stellt an die Wasserversorgung geringe Ansprüche, benötigt allerdings Temperaturen von mindestens 12 °C dauerhafte Bodentemperatur zur Aussaat und 15 °C für ein zügiges Wachstum. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt stirbt die Pflanze ab.

Diese Hirseart findet sowohl als Viehfutter als auch in der Nahrungsmittel- und Industrierohstoffproduktion Verwendung. Bei letztgenannten Verwendungsarten werden die ausgereiften Körner zu Öl- und Stärkeprodukten verarbeitet.

Beim Anbau als Futterpflanze ist darauf zu achten, dass bei Temperaturen unter 10 °C Blausäure in den Pflanzenteilen entsteht und diese sich auch in der Silage wiederfinden kann. Von einer Verfütterung ist dann abzusehen.

In den Versuchen kam die Hybridsorte „Susu“ zum Anbau.

Zuckerhirse

Wie Sudangras stellen auch die verschiedenen Sorten der Zuckerhirse keine großen Ansprüche an Boden und Wasser, jedoch sind sie ebenso frostempfindlich und wärmebedürftig. Ähnlich wie Sudangras stellt diese Hirse ihr Wachstum bei Temperaturen von unter 12 °C nahezu ein.

Hirsen werden, wie Mais, als Grünfutter verwendet und bringen bei günstigen Wachstumsbedingungen annähernd gleiche Erträge. In den USA wird die Pflanze vorwiegend zur Zucker- und Sirupherstellung genutzt. In Südafrika, Australien und Brasilien finden Zuckerhirschen auch zur Herstellung von Bioethanol Verwendung.

In den Versuchen im Rahmen des Projektes standen die Sorten „Friggo“, „Super Sile 15“ (SS 15), „Super Sile 18“ (SS 18), „Super Sile 20“ (SS 20), „Rona“ und „Goliath“ zu Verfügung. Die Sorte „Friggo“ ist sehr kolbenbetont und wurde im 3. Versuchsjahr wegen der niedrigen Erträge der Vorjahre nicht mehr angebaut. Die Sorten „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ zeichnen sich durch ein höheres Massenwachstum aus. Die Sorte „Super Sile 15“ ist kleinwüchsiger als die letztgenannten, dafür aber stämmiger, ähnlich der Sorte „Rona“. Die Hirse „Goliath“ ist hochwüchsig und äußerst massebetont.

Luzerne- und Klee gras

Die Saatgutmischung des auf trockeneren Standorten angebauten Luzernegrases bestand zu 80 % aus Luzerne, 5 % Lieschgras und 15 % Wiesenschwingel, die Klee grassmischung, die auf feuchten Standorten zum Anbau kam, aus 50 % Rotklee, 20 % Lieschgras und 30 % Wiesenschwingel.

Die in den Mischungen enthaltenen Gräser zeichnen sich durch eine hohe Ertragssicherheit, besonders bei trockeneren Bedingungen, aus. Die Nutzungshäufigkeit liegt je nach Standort bei zwei bis vier Schnitten pro Jahr.

Sowohl Luzerne- als auch Klee gras sind mit Zugabe entsprechender Silierhilfsmittel nicht schwieriger zu silieren als reiner Grasschnitt. Es ist jedoch zu beachten, dass das Pflanzenmaterial nach der Mahd bis zu einem Trockensubstanzgehalt von mindestens 30 % vor dem Einsilieren anwelken muss.

Topinambur

Zum Einsatz als Koferment in Biogasanlagen eignen sich theoretisch bei dieser Pflanzenart sowohl Knollen als auch Kraut. Seit geraumer Zeit gibt es Bestrebungen, Topinambur nicht nur hinsichtlich eines hohen Knollenertrages als Nahrungsmittel und zur Destillatproduktion, sondern auch auf einen hohen Krautanteil zur Biomassenutzung zu züchten.

Der Einsatz der Knollen bereitet allerdings durch den niedrigen TS-Gehalt Schwierigkeiten bei der Silierung und durch den anhaftenden Schmutz große Probleme im Biogasfermenter.

Der Anbau zur einjährigen Nutzung von Kraut und Knollen erfolgte in den Versuchen in Dammkultur, wobei die knollenbetonte Sorte „Gute Gelbe“ zum Anbau kam, der zur mehrjährigen Krautnutzung (3 Jahre) mit der massewüchsigen Sorte „Lola“ auf ebenem Acker.

Im einjährigen Anbau wurden im ersten Anbaujahr sowohl Knolle als auch Kraut zu den jeweiligen Schnittzeitpunkten geerntet und weiterverarbeitet. Aufgrund der niedrigen Erträge bei den frühen Ernten erfolgte ab dem 2. Versuchsjahr die Ernte der Knollen aller Varianten zum Termin der letzten Krauternte. Beim mehrjährigen Anbau kam nur das Kraut zur Beerntung.

Durchwachsene Silphie

Diese ausdauernde Pflanze wurden zwischen 1970 und 1980 versuchsweise zur Futternutzung angebaut. Sie zeichnet sich durch einen guten Futterwert sowie hohe und stabile Erträge aus (Dissertation Neumärkel, 1980, Halle). Die Durchwachsene Silphie stellt geringe Ansprüche an Klima und Boden und bedarf außer im Anbaujahr wenig Pflege über die gesamten Nutzungsjahre. Die landwirtschaftliche Nutzungsdauer beträgt ca. 12 bis 15 Jahre, wenn die Pflanze zur Futtergewinnung zweimal pro Jahr geschnitten wird. Bei einer einmaligen Ernte, wie

beispielsweise zur Verwendung als Koferment, ist eine wesentlich längere Nutzungsdauer wahrscheinlich.

Die Silphie wächst im ersten Jahr relativ langsam und bildet nur eine grundständige Blattrosette aus. Das Wachstum konzentriert sich in dieser Zeit auf die Ausbildung eines starken Wurzelsystems. Ein verwertbarer Biomasseertrag setzt ab dem zweiten Vegetationsjahr ein.

2.3 Verarbeitungsversuche

2.3.1 Silierversuche

Um Aussagen über die Verarbeitungseignung der angebauten Pflanzenarten treffen zu können, wurden Silierversuche mit dem Erntegut des Standortes Dornburg durchgeführt. Als Silierhilfsmittel ist ein einheitliches handelsübliches Milchsäurepräparat verwendet worden, da bei der vorhergehenden Erprobung verschiedener Hilfsmittel kein Unterschied bezüglich ihrer Wirkung auf die Qualität der Silage und die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe zu erkennen war.

Die Silierung selbst erfolgte in 1 l-Weckgläsern, indem das jeweilige zerkleinerte und homogenisierte Pflanzenmaterial so fest wie möglich in die Gläser gestopft und mit einem Silierhilfsmittel angeimpft wurde. Das Gewicht des gestopften Materials betrug im Durchschnitt 700 Gramm. Die Silagegläser lagerten dann bei einer Temperatur von 20 bis 25 °C 90 Tage in einem verdunkelten Raum. Diese Silage war sowohl das Ausgangsmaterial für die Bestimmung der relevanten Inhaltsstoffe im Labor als auch für die diskontinuierlichen Gärversuche im 1- und 20 l-Maßstab.

Mit gleicher Verfahrensweise ist auch die Silage für die drei kontinuierlichen Versuche hergestellt worden, allerdings in 60 l-PE-Fässern.

2.3.2 Minibatchversuche

Die für die Minibatchversuche als Koferment verwendeten Silagen stammten von Pflanzenmaterial unterschiedlicher Erntezeitpunkte. Vor der Silierung wurde das Erntegut zerkleinert und homogenisiert. Die verwendete Rindergülle stammte von der MPK Milchproduktion Kleingeschwenda/A. GmbH.

Zum Starten des anaeroben Gärprozesses wurde ausgegorenes Faulschlamm-Filtrat aus dem Überlauf des Faulturmes der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage Jena benutzt, welches im Folgenden als Impfschlamm bezeichnet wird.

Die Probenahme für die Bestimmung der TS- und oTS-Gehalte und für die Probeneinwaage erfolgte, indem die gesamte Ausgangsmenge der jeweiligen Silagen über einen Probenteiler gegeben wurde, um es in repräsentative Teilmengen aufzuteilen.

Die Versuchsdurchführung lief entsprechend der Vorschriften in DIN 38414 Teil 8 und der VDI-Richtlinie 4630 „Vergärung organischer Stoffe“.

Es wurden von jedem Kosubstrat zwei Gärversuche im 1 l-Minibatch angesetzt, wobei Rindergülle mit dem Kosubstrat und Impfschlamm vermischt wurde. Das Mischungsverhältnis betrug 80 % Rindergülle zu 20 % Kosubstrat, bezogen auf den oTS-Gehalt der Substrate.

Der Impfschlammanteil ergibt sich entsprechend einer Berechnungsformel in der VDI-Richtlinie 4630 in Abhängigkeit von der Substratzusammensetzung.

Referenzversuche mit 100 % Rindergülle und Impfschlamm erfolgten jeweils als Doppelbestimmung im 1 l-Minibatch.

Der Impfschlamm in den Versuchsansätzen ist notwendig, um günstigere Bedingungen für den Start der Vergärung zu schaffen. Um den Einfluss des Impfschlammes auf die ermittelten Gasausbeuten zu eliminieren, wurde in einem Nullversuch die Gasbildung ohne Zusätze bestimmt. Die Ergebnisse der Gärversuche sind um die Ergebnisse des Nullversuchs korrigiert.

Die Versuche wurden zeitgleich begonnen, identischen Bedingungen im Thermoraum bei 37 °C über einen Zeitraum von 30 Tagen ausgesetzt und zeitgleich beendet.

Für die Berechnung der Biogasausbeute und die Beurteilung der Abbauvorgänge während des Gärprozesses war es notwendig, den Anteil an TS und oTS am Input- und Outputmaterial zu bestimmen.

Das gebildete Biogas ist je Fermenter in einem separaten Gasbeutel aufgefangen und nach Beendigung der Versuche analysiert worden.

Die Biogasmenge konnte anhand der in den Gasbeuteln aufgefangenen Gasmenge mit dem Präzisions-Gasdurchfluss-Messgerät „M-XXSLPM-D“ der Firma GMR, Zella-Mehlis, gemessen werden. Die Ermittlung der Gaszusammensetzung (Methan, Kohlendioxid, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff) erfolgte mit dem Mehrkanal-Gasanalysator „Biogas 401“ der Firma A-DOS GmbH Aachen.

2.3.3 Batchversuche

Die Gärversuche in 20 l-Batchfermentern sind mit den Pflanzenarten:

- Energiemais „PR38F53“
- Energiemais „Doge“
- Sudangras „Susu“
- Zuckerhirse „Friggo“
- Zuckerhirse „Super Sile 20“
- Topinambur einjährig „Gute Gelbe“

durchgeführt worden.

Die Vorbereitung und Durchführung der Versuche erfolgte analog zu den Minibatchversuchen.

2.3.2 Kontinuierliche Versuche

Zur Durchführung der kontinuierlichen Versuche wurde Pflanzenmaterial der 2. Probeernte (PE) von Luzernegras, Topinambur und Durchwachsener Silphie im 2. Anbaujahr in 60 l-Fässern über einen Zeitraum von 90 Tage siliert.

Die Versuche zur Vergärung erfolgten über einen Zeitraum von 60 Tagen in einem 150 l-Biogasreaktor, der mit Rindergülle (TS-Gehalt = 8 %) und einem Koferment (Partikelgröße < 25 mm) beschickt wurde. Die tägliche Substratmischung bestand zu 80 % oTS aus Rindergülle-

le und zu 20 % oTS aus Zuckerhirse. Das Reaktorvolumen betrug 120 l. Die Kofermentation erfolgte mit einer Faulraumbelastung von ca. 2 kg oTS/(m³ x d) und mit einer Verweilzeit von 40 Tagen. Der Rührer drehte sich ständig mit einer Drehzahl von 8 U/min.

Die Aufbereitung der Materialien und die Methodik der Analysen entsprachen ebenfalls der erläuterten Vorgehensweise wie bei den Minibatchversuchen.

2.4 Theoretisch mögliche Gasausbeute

Die Berechnung der theoretisch möglichen Gasausbeute (Tab. 3, 6 und 8) erfolgte nach den Vorgaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. laut „Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung“ (S. 30 - 31, 2005). Wie bereits in der Handreichung hingewiesen, bestehen zwar Parallelen zwischen der Vergärung in Biogasanlagen und dem Verdauungstrakt von Wiederkäuern, diese sind aber nur bedingt vergleichbar. Die Berechnungsmethode lässt aber dennoch eine Abschätzung der Biogas- und Methanausbeute und vor allem einen Vergleich zwischen verschiedenen Pflanzenarten oder unterschiedlichen Erntezeitpunkten zu. Die berechneten Werte dürfen aber nicht für betriebliche oder ökonomische Kalkulationen herangezogen werden.

Die für die Berechnung notwendigen Verdauungskoeffizienten (VQ) der organischen Inhaltsstoffe sind weitestgehend in der DLG-Futterwerttabelle für Wiederkäuer aufgeführt. Nicht vorhanden sind die VQ von Topinamburkraut. Hier wurde auf die für Sonnenblume geltenden VQ zurückgegriffen. Des Weiteren sind für die Durchwachsene Silphie entsprechende VQ nur in einem Bericht von Neumärkel und Märtin (1981) enthalten, die für die Berechnung Anwendung fanden.

2.5 Weiterführende anbautechnische Versuche

Zweitfruchtanbau

Ziel dieses Versuches war es, die Ertragsergebnisse von Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung zu vergleichen.

Der Versuch wurde in zwei Versuchsjahren an den Standorten Dornburg, Heßberg und Kirchengel angelegt. Als Winterzwischenfrüchte (WZF) kamen Landsberger Gemenge und Winterfütterroggen zum Anbau. Nach jeder WZF ist dann sowohl Mais als auch Sudangras ausgesät worden. Eine Variante je Art ohne vorherigen Winterzwischenfruchtanbau zum ortsüblichen Aussattermin für Silomais Ende April diente als Vergleich. Im Anschluss an die Ernte, die zum üblichen Termin für die Silomaisernte einheitlich in allen Prüfgliedern vorgenommen wurde, erfolgte die Untersuchung des Erntegutes und der Silage auf den Gehalt an organischen Inhaltsstoffen.

Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras

Der im Jahr 2006 am Standort Dornburg durchgeführte Versuch diente Untersuchungen zur Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras. Dabei erfolgte die Aussaat beider Fruchtarten zu zwei Terminen. Der erste Termin Ende April entsprach einem Anbau in Hauptfruchtstellung, der zweite Mitte Mai einer Aussaat in Zweitfruchtstellung. Die Sortenwahl erfolgte analog zum

vorab beschriebenen Zweitfruchtversuch: als Hauptfruchtmais kamen „Maibi“, als Zweitfruchtmais „Constantino“, beim Sudangras in beiden Varianten die Sorte „Susu“ zum Anbau. Geerntet wurde ab einer Wuchshöhe von ca. 50 cm im Abstand von zwei Wochen und jeweils der Ertrag und der TS-Gehalt bestimmt.

2.6 Herbizidversuche

Entscheidend für einen wirtschaftlichen Anbau der einzelnen Kulturen ist ein effizienter Pflanzenschutz, vor allem bezüglich der Bekämpfung von Unkräutern im Jungpflanzenstadium.

Da insbesondere für Topinambur und Durchwachsene Silphie keinerlei Pflanzenschutzmittel zugelassen sind, kamen in der VS Dornburg im Jahr 2005 Herbizidversuche zu den beiden Kulturen zur Anlage. Die Versuche wurden 2006 unter Einbeziehung einer Maschinenhackvariante wiederholt.

3 Ergebnisse

3.1 Mehrortiger Anbauvergleich Energiepflanzen

3.1.1 Versuchsstandort Dornburg

3.1.1.1 Erträge und theoretisch mögliche Gasausbeute in getrocknetem Pflanzenmaterial und Silage

In Dornburg kam im Projektverlauf das umfangreichste Spektrum an Pflanzenarten zum Anbau. Es umfasste im ersten Versuchsjahr 2004, neben den zwei Maissorten, Sudangras, zwei Zuckerhirsen, Topinambur im ein- und mehrjährigen Anbau sowie Luzernegras. Die Erträge sowie die theoretisch möglichen Gasausbeuten des Jahres 2004 beinhaltet Tabelle 3.

Alle geprüften Arten wurden zu drei unterschiedlichen Terminen entsprechend der Entwicklung ihres TS-Gehaltes beerntet. Lediglich beim Mais „PR38F53“ konnte wegen eines Wildschadens nur eine Probeernte erfolgen.

Beim Mais „Doge“ war der Methanertrag in der ersten Probeernte am höchsten, obwohl zu diesem Erntezeitpunkt die optimale Siloreife noch nicht erreicht war. Die Zuckerhirse „Super Sile 20“ zeigte in der 1. und 2. Probeernte vergleichbare Werte zu Mais, ebenso das Sudangras in der 2. Probeernte.

Von den angebauten Zuckerhirsen wies die Sorte „Super Sile 20“ einen wesentlich höheren Ertrag auf als die Sorte „Friggo“, die sehr frühreif und kolbenbetont war. Die Werte beider Sorten zeigen, dass der beste Ertrag zum Termin der 1. und 2. Probeernte erreicht wurde.

Ernte und Verarbeitung von Topinamburknollen war erst bei der 3. Probeernte lohnenswert, da die Pflanzen zu den früheren Ernteterminen kaum Knollen ausgebildet hatten. Da sich aber bei der Silierung dieser Knollen ein hoher Anteil Sickersaft (ca. 25 %) bildet, ist die Verarbeitung zu Silage als Topinamburganzpflanze, d. h. im Gemisch von Kraut und Knolle, überlegenswert.

Die Biomasse- und Methanerträge beim Kraut des Topinambur verdeutlichen, dass im ersten Anbaujahr sowohl bei Sorte „Gute Gelbe“, die nur im einjährigen Anbau geprüft wurde, als auch bei der Sorte „Lola“ für den mehrjährigen Anbau die 2. Probeernte die höchste Methanausbeute ergab. Der unterschiedlich hohe Gehalt ist nur durch die unterschiedlichen eingesetz-

ten Sorten der beiden Versuche erklärbar, da beide in 2004 angelegt wurden und somit de facto beide einjährig waren.

Bei Luzernegras zeigte sich, dass sich der Methanertrag von Blühbeginn bis Blühende nur geringfügig ändert. Der insgesamt geringe Ertrag ist damit zu begründen, dass diese Kultur im ersten Anbaujahr nur einen Schnitt zulässt.

Tabelle 3: Biogas- und Methanausbeuten sowie Biomasse- und Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Dornburg 2004

| Substrat | Erntetermin 2004 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m ³ /ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Mais PR38F53 | 16.09. | 25,4 | 587,1 | 299,4 | 126,0 | 3772 |
| Mais Doge | 16.09. | 28,9 | 568,0 | 295,3 | 158,0 | 4665 |
| Mais Doge | 13.10. | 25,2 | 580,8 | 296,2 | 123,0 | 3643 |
| Mais Doge | 28.10. | 27,2 | 572,9 | 292,2 | 120,0 | 3506 |
| Sudangras Susu | 16.09. | 24,6 | 533,0 | 277,2 | 108,0 | 2994 |
| Sudangras Susu | 13.10. | 28,2 | 497,2 | 258,6 | 124,0 | 3207 |
| Sudangras Susu | 28.10. | 28,5 | 473,6 | 246,3 | 100,0 | 2463 |
| Zuckerhirse Friggo | 16.09. | 26,0 | 632,7 | 329,0 | 112,0 | 3684 |
| Zuckerhirse Friggo | 13.10. | 30,0 | 494,1 | 256,9 | 109,0 | 2800 |
| Zuckerhirse Friggo | 28.10. | 32,4 | 469,7 | 244,2 | 94,0 | 2296 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 16.09. | 26,2 | 534,9 | 278,1 | 146,0 | 4060 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 13.10. | 29,4 | 479,5 | 244,5 | 136,0 | 3325 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 28.10. | 29,4 | 473,0 | 246,0 | 114,0 | 2804 |
| Topinambur einjährig Kraut | 30.08. | 29,5 | 545,9 | 278,4 | 122,0 | 3396 |
| Topinambur einjährig Kraut | 20.09. | 35,2 | 547,9 | 279,4 | 147,0 | 4107 |
| Topinambur einjährig Kraut | 12.10. | 26,0 | 536,3 | 273,5 | 112,0 | 3063 |
| Topinambur einjährig Knolle | 30.08. | 23,9 | 680,5 | 347,0 | 14,0 | 485 |
| Topinambur einjährig Knolle | 20.09. | 23,0 | 685,5 | 349,6 | 21,0 | 734 |
| Topinambur einjährig Knolle | 12.10. | 23,2 | 687,2 | 350,4 | 62,0 | 2172 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 30.08. | 24,7 | 563,5 | 287,4 | 117,0 | 3362 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 20.09. | 33,5 | 548,3 | 279,6 | 121,0 | 3383 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 12.10. | 38,8 | 535,4 | 273,0 | 77,0 | 2102 |
| Luzerne Schröpschnitt | 26.07. | 19,3 | 534,2 | 293,8 | 84,0 | 2468 |
| Luzerne, Blühbeginn | 30.08. | 23,4 | 522,0 | 287,1 | 40,0 | 1148 |
| Luzerne, Vollblüte | 20.09. | 26,4 | 520,2 | 280,9 | 36,0 | 1011 |
| Luzerne, Blühende | 13.10. | 29,6 | 510,5 | 280,8 | 40,0 | 1123 |

Im zweiten Versuchsjahr 2005 kam im Wesentlichen das gleiche Pflanzenspektrum zum Anbau. Lediglich die Zuckerhirsen „Super Sile 15“ und „Super Sile 18“ wurden mit je einer Probe-ernte neu ins Versuchsspektrum aufgenommen. Die Ergebnisse des Erntegutes und der daraus gewonnenen Silagen beinhalten die Tabellen 4 und 5.

Der Energiemais „Doge“ überzeugte auch im zweiten Versuchsjahr durch seine hohen Erträge und gleichzeitig sehr hohen Methanerträge je Hektar. Beide Maissorten „Doge“ und „PR38F53“ wiesen eine relativ stabile Silierung auf, indem kaum Silierverluste zu verzeichnen waren.

Das Sudangras erreichte zum 2. Schnitttermin den höchsten Methanertrag, der allerdings beim Silieren um fast 25 % abnahm, was möglicherweise auf eine schlechtere Siliereignung des Sudangrases hindeutet.

Ähnlich verhielten sich die Zuckerhirsesorten „Super Sile 20 und 15“. Die besten Ergebnisse erreichte hier die Hirse „Super Sile 18“ mit dem höchsten Methanertrag und einer stabilen Si-

lierung. Gleiche Ergebnisse zeigte auch die Hirse „Friggo“, die allerdings durch ihre geringen Erträge für den Anbau als Biogaspflanze ungeeignet scheint. Generell lagen die Erträge der massebetonten Zuckerhirsen „Super Sile 15, 18 und 20“ 2005 auf etwa dem gleichen Niveau wie das Sudangras, das im zweiten Projektjahr deutlich besser abschnitt als 2004.

Topinamburkraut eignet sich, wie die Methanerträge pro Hektar auch im zweiten Versuchsjahr zeigen, sehr wenig zur Nutzung als Kofermentpflanze. Die Werte lagen in etwa im Bereich der Zuckerhirsesorte „Friggo“. Der Grund ist in den sehr hohen Verlusten bei der Silierung zu suchen. Einzige Alternative wäre der Einsatz als Ganzpflanze, also die Verwendung von Kraut und Knolle, wobei hierbei wiederum die eingangs erwähnten Probleme der Sickersaftbildung und dem Eintrag von Schmutz in den Fermenter zum Tragen kämen.

Die Durchwachsene Silphie erreichte nicht nur sehr gute Methangehalte auf Grund der Zusammensetzung ihrer organischen Inhaltsstoffe, sondern sie war auch durch ihre sehr hohen Erträge die Pflanze, die den höchsten Methanertrag pro Hektar erzielte und durchaus mit dem Energiemais „Doge“ vergleichbar ist. Durch die Silierung traten nur sehr geringe Verluste auf, so dass der Methanertrag vor allem zum 2. Schnitttermin der höchste von allen untersuchten Pflanzenarten blieb.

Bei der Durchwachsenen Silphie wurden außerdem zwei Zerkleinerungsmethoden (Schneidemaschine und Häcksler) getestet, um den Einfluss unterschiedlicher Schnittlängen des Pflanzenmaterials auf die Silierbarkeit und eventuelle Veränderungen der organischen Inhaltsstoffe zu prüfen. Es traten jedoch im Vergleich zur üblichen Vorgehensweise keine nennenswerten Unterschiede auf.

Das Luzernegras im zweiten Anbaujahr erreichte die höchste Methanausbeute (l/kg oTS) zu Blühbeginn in drei Folgeschnitten. Durch einen höheren Ertrag in der Vollblüte wurde der etwas niedrigere Methangehalt zu diesem Zeitpunkt jedoch wieder ausgeglichen und die Methanerträge je Flächeneinheit waren fast identisch. Bei der Silage hingegen gab es bei der Ernte zur Vollblüte kaum Differenzen bezüglich der Methanausbeute, bei dem Schnitt zu Blühbeginn sanken die Methanausbeute und der Methanertrag von Ernte zu Ernte etwas ab.

Tabelle 4: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Dornburg 2005

| Substrat | Erntetermin 2005 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 24.08. | 28,2 | 541,8 | 295,0 | 160,7 | 4740 |
| Mais PR38F53 | 07.09. | 29,7 | 571,7 | 308,2 | 170,0 | 5239 |
| Mais PR38F53 | 13.09. | 28,3 | 558,8 | 302,8 | 157,2 | 4760 |
| Mais Doge | 24.08. | 18,3 | 524,7 | 285,4 | 135,6 | 3870 |
| Mais Doge | 07.09. | 22,7 | 557,7 | 301,8 | 190,3 | 5743 |
| Mais Doge | 10.10. | 25,2 | 568,3 | 306,2 | 213,3 | 6531 |
| Sudangras Susu | 24.08. | 22,9 | 540,0 | 292,7 | 121,1 | 2545 |
| Sudangras Susu | 07.09. | 32,4 | 515,7 | 280,4 | 199,9 | 5605 |
| Sudangras Susu | 21.09. | 28,0 | 454,6 | 244,5 | 160,2 | 3917 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 24.08. | 18,3 | 520,2 | 281,3 | 107,1 | 3013 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 07.09. | 26,0 | 500,4 | 273,4 | 162,1 | 4432 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 21.09. | 23,4 | 449,2 | 242,7 | 159,1 | 3861 |
| Zuckerhirse Super Sile 15 | 24.08. | 19,2 | 526,6 | 288,1 | 88,6 | 2553 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 07.09. | 30,6 | 452,3 | 246,3 | 201,3 | 4958 |
| Zuckerhirse Friggo | 24.08. | 22,5 | 527,9 | 289,6 | 80,4 | 2328 |
| Zuckerhirse Friggo | 07.09. | 24,7 | 499,6 | 274,6 | 94,0 | 2581 |
| Zuckerhirse Friggo | 21.09. | 25,4 | 440,2 | 240,6 | 87,8 | 2112 |
| Topinambur einjährig Kraut | 24.08. | 18,0 | 487,6 | 267,1 | 87,1 | 2326 |
| Topinambur einjährig Kraut | 07.09. | 22,9 | 508,1 | 276,2 | 113,9 | 3146 |
| Topinambur einjährig Kraut | 21.09. | 27,2 | 495,3 | 267,3 | 135,7 | 3627 |
| Topinambur einjährig Kraut | 10.10. | 28,7 | 503,1 | 272,6 | 118,4 | 3228 |
| Topinambur einjährig Knolle | 10.10. | 19,3 | 508,8 | 276,4 | 55,5 | 1534 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 25.08. | 35,4 | 555,2 | 296,2 | 146,6 | 4342 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 07.09. | 37,4 | 512,6 | 278,3 | 137,0 | 3813 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 13.09. | 41,9 | 530,3 | 283,6 | 155,2 | 4401 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 25.08. | 25,0 | 601,6 | 325,8 | 146,7 | 4780 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 07.09. | 30,9 | 588,1 | 319,8 | 208,3 | 6661 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 13.09. | 27,6 | 619,4 | 337,0 | 185,6 | 6255 |
| Luzerne Blühbeginn | 02.06. | 23,5 | 433,9 | 244,7 | 76,0 | 1860 |
| | 13.07. | 25,1 | 457,6 | 255,1 | 52,4 | 1337 |
| | 19.08. | 31,3 | 457,1 | 257,0 | 37,9 | 974 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 449,6 | 252,3 | 166,3 | 4196 |
| Luzerne Vollblüte | 02.06. | 23,5 | 400,3 | 227,1 | 76,0 | 1726 |
| | 10.08. | 35,0 | 428,9 | 245,3 | 74,0 | 1815 |
| | 10.10. | 30,9 | 420,5 | 237,0 | 26,7 | 633 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 416,6 | 236,5 | 176,7 | 4174 |

Tabelle 5: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Silagen aus Biomassepflanzen, VS Dornburg 2005

| Substrat | oTS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| Mais PR38F53 | 95,0 | 491,65 | 267,87 | 173,0 | 4634 |
| Mais PR38F53 | 95,5 | 506,13 | 273,38 | 183,0 | 5003 |
| Mais PR38F53 | 95,3 | 526,69 | 286,06 | 170,2 | 4869 |
| Mais Doge | 93,8 | 484,38 | 262,43 | 146,6 | 3846 |
| Mais Doge | 96,6 | 486,96 | 262,17 | 206,1 | 5404 |
| Mais Doge | 94,7 | 524,22 | 281,87 | 226,7 | 6391 |
| Sudangras Susu | 93,8 | 439,73 | 238,73 | 131,2 | 3132 |
| Sudangras Susu | 94,8 | 441,81 | 237,92 | 186,3 | 4432 |
| Sudangras Susu | 91,8 | 421,30 | 227,93 | 170,1 | 3847 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 93,0 | 435,40 | 237,33 | 107,1 | 2542 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 95,1 | 430,93 | 232,73 | 162,1 | 3772 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 96,1 | 394,24 | 213,43 | 159,1 | 3375 |
| Zuckerhirse Super Sile 15 | 91,6 | 397,28 | 219,29 | 95,2 | 2088 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 93,0 | 415,34 | 224,00 | 219,2 | 4910 |
| Zuckerhirse Friggo | 92,1 | 436,39 | 239,56 | 80,4 | 1926 |
| Zuckerhirse Friggo | 91,8 | 432,87 | 238,12 | 94,0 | 2238 |
| Zuckerhirse Friggo | 91,8 | 402,38 | 221,46 | 87,8 | 1945 |
| Topinambur einjährig Kraut | 88,7 | 338,53 | 187,05 | 96,0 | 1796 |
| Topinambur einjährig Kraut | 91,1 | 346,99 | 190,76 | 125,1 | 2387 |
| Topinambur einjährig Kraut | 89,8 | 362,00 | 199,95 | 144,2 | 2884 |
| Topinambur einjährig Kraut | 93,3 | 346,43 | 189,15 | 127,0 | 2403 |
| Topinambur einjährig Knolle | 86,9 | 866,94 | 466,19 | 59,4 | 2769 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 93,8 | 358,27 | 193,27 | 162,8 | 3146 |
| Topinambur mehrj. Kraut | | | | 147,2 | Probe verworfen |
| Topinambur mehrj. Kraut | 96,8 | 351,80 | 188,88 | 170,3 | 3217 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 89,7 | 573,05 | 312,38 | 146,7 | 4583 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 93,0 | 573,84 | 309,06 | 208,3 | 6439 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 88,2 | 572,13 | 311,90 | 185,6 | 5789 |
| Durchw. Silphie, Schneidm. | 88,8 | 575,80 | 312,81 | 208,3 | 6516 |
| Durchw. Silphie, Häcksler | 89,8 | 579,87 | 315,96 | 208,3 | 6582 |
| Luzerne Schröpf. | 91,7 | 424,90 | 233,02 | 76,0 | 1771 |
| Luzerne BB 2.Sch. | 91,0 | 408,53 | 223,89 | 52,4 | 1173 |
| Luzerne BB 3.Sch. | 90,9 | 404,74 | 221,94 | 37,9 | 8410 |
| Luzerne VB 1.Sch. | 91,6 | 426,03 | 233,91 | 74,0 | 1731 |
| Luzerne VB 2.Sch. | 91,6 | 416,10 | 230,13 | 26,7 | 614 |

Insgesamt bestätigten im zweiten Versuchsjahr am Standort Dornburg die massebetonten Zuckerhirsens, das Sudangras und das Luzernegras sowie die Durchwachsene Silphie ihre Konkurrenzfähigkeit als Kofermentpflanze im Vergleich zu Mais. Schlechtere Ergebnisse wies der Topinambur sowohl in ein- als auch in mehrjähriger Nutzung auf. Die Zuckerhirse „Friggo“ wurde aufgrund ihrer geringen Biomasseerträge aus dem Versuchsprogramm gestrichen und im Jahr 2006 durch die aussichtsreichere Sorte „Super Sile 18“ ersetzt. Im dritten Projektjahr kamen, neben den bereits zweijährig geprüften Pflanzen, außerdem die Hirsehybriden „Rona“ und „Goliath“ zu je einem Erntetermin zum Anbau (Tab. 6 und 7).

Entgegen dem Vorjahr wies der Mais „PR38F53“ eine kontinuierliche Steigerung des Ertrages und damit verbunden auch des Methanertrages auf. Die Silierverluste waren gering und bestätigten das eben dargestellte Ergebnis.

Beim Energiemais „Doge“ ist ein Anwachsen der Methanerträge mit aufsteigenden Erntetermin in der Pflanze und der Silage zu erkennen. Die späte Sorte profitierte 2006 eindeutig durch den langen warmen Herbst, was sich in einer guten Kolbenausbildung widerspiegelte. Den für eine sichere Silierung erforderlichen TS-Gehalt erreichte „Doge“ allerdings erst Mitte Oktober. Kaum erklärbar ist der extrem hohe Methangehalt der Silageprobe der Ernte am 29. September, die den Wert des Pflanzenmaterials um mehr als 100 l/kg oTS übersteigt.

Das Sudangras schnitt 2006 in ertraglicher Hinsicht deutlich schlechter ab als im Vorjahr und kam nicht an die Ergebnisse der Zuckerhirsesorten heran. Beim Vergleich der Methangehalte in Pflanze und Silage fällt auf, dass zu den ersten beiden Ernten bei der Silierung Verluste auftraten, bei der dritten Probeernte stieg dagegen, ähnlich wie bei „Doge“ die Methanausbeute in der Silage im Vergleich zur Pflanze deutlich an.

Die Zuckerhirsen „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ bestätigten ihre Ertragsleistung der Vorjahre. Die Silierverluste lagen etwa im Bereich des Sudangrases. Die erstmalig geprüfte Sorte „Rona“ wies Erträge unter 100 dt TM/ha bei überdurchschnittlich hohen Silierverlusten auf. Dagegen zeichnete sich die Hirse „Goliath“ durch einen sehr hohen Ertrag aus. Trotz der geringen Niederschläge im Juni und Juli erreichte sie Wuchshöhen von nahezu 4 m bei guter Standfestigkeit. Die Silierverluste lagen unter 10 %.

Der Topinambur im einjährigen Anbau erbrachte nur mittlere Krauterträge von unter 150 dt TM/ha. Im mehrjährigen Anbau war zu erkennen, dass die Stängelanzahl von Jahr zu Jahr zwar zunahm, diese aber immer dünner wurden und relativ schnell stark verholzten, so dass im dritten Standjahr bereits im August TS-Gehalte von über 30 % zu verzeichnen waren. Aufgrund der starken Konkurrenz der Einzeltriebe muss spätestens nach dem 2. Standjahr der Bestand durch mechanische Bodenbearbeitungsmaßnahmen, z. B. Grubbern, ausgedünnt werden. Es traten wiederum sehr hohe Silierverluste auf.

Bei der Durchwachsenen Silphie stieg sowohl im zwei- als auch im dreijährigen Bestand der Ertrag und die damit verbundene Methanproduktion von Erntetermin zu Erntetermin an. Generell waren die Erträge etwas niedriger als im Vorjahr, lagen aber durchaus im Bereich von Silomais und der ertragsreichen Zuckerhirse „Super Sile 20“. Der zweijährige Bestand wurde 2005 als Herbizidversuch angelegt und erstmals beerntet. Das Saatgut für diesen Versuch stammt aus dem Zierpflanzenhandel, was die etwas niedrigere Wuchshöhe und den früheren Blühbeginn erklärt. Insgesamt wirkte diese Herkunft etwas kompakter als die aus Nordamerika stammende Varietät im dritten Anbaujahr. Silierverluste traten bei beiden Herkunftsorten kaum auf und können vernachlässigt werden.

Die kumulierten Werte für Ertrag und Methanertrag der Luzerne belegen, dass auch diese Pflanze als Koferment durchaus anbauwürdig ist. So übertraf sie Sudangras und Topinambur 2006 deutlich. Dabei unterschieden sich die Ernten zu Blühbeginn und zur Vollblüte kaum voneinander. Die Silierverluste waren marginal. Erhebliche Kosten verursacht jedoch die notwendige dreimalige Ernte und Verarbeitung.

Tabelle 6: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Dornburg 2006

| Substrat | Erntetermin 2006 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 31.08. | 25,9 | 539,0 | 292,0 | 146,6 | 4281 |
| Mais PR38F53 | 12.09. | 31,3 | 572,0 | 308,0 | 161,4 | 4971 |
| Mais PR38F53 | 25.09. | 38,1 | 559,0 | 303,0 | 188,3 | 5706 |
| Mais Doge | 31.08. | 20,4 | 551,0 | 298,0 | 158,5 | 4723 |
| Mais Doge | 12.09. | 26,4 | 558,0 | 302,0 | 211,9 | 6399 |
| Mais Doge | 25.09. | 25,7 | 543,0 | 293,0 | 212,2 | 6218 |
| Mais Doge | 13.10. | 31,4 | 561,0 | 303,0 | 256,9 | 7784 |
| Sudangras Susu | 21.08. | 24,9 | 534,0 | 290,0 | 91,8 | 2662 |
| Sudangras Susu | 31.08. | 26,3 | 506,0 | 274,0 | 103,6 | 2839 |
| Sudangras Susu | 11.09. | 27,3 | 455,0 | 245,0 | 111,3 | 2727 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 31.08. | 23,1 | 539,0 | 293,0 | 139,0 | 4073 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 11.09. | 24,4 | 508,0 | 274,0 | 163,0 | 4466 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 25.09. | 34,4 | 447,0 | 242,0 | 210,2 | 5087 |
| Zuckerhirse Rona | 11.09. | 26,1 | 536,0 | 289,0 | 95,1 | 2748 |
| Hirse Goliath | 11.09. | 35,7 | 447,0 | 244,0 | 288,9 | 7049 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 31.08. | 21,4 | 534,0 | 290,0 | 131,1 | 2802 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 11.09. | 25,2 | 500,0 | 275,0 | 184,2 | 5066 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 25.09. | 28,1 | 448,0 | 242,0 | 155,0 | 3751 |
| Topinambur einjährig Kraut | 06.09. | 21,1 | 518,0 | 282,0 | 91,0 | 2566 |
| Topinambur einjährig Kraut | 15.09. | 26,7 | 520,0 | 283,0 | 131,4 | 3719 |
| Topinambur einjährig Kraut | 25.09. | 31,1 | 517,0 | 279,0 | 144,3 | 4026 |
| Topinambur einjährig Knolle | 13.10. | 26,3 | 498,0 | 267,0 | 90,3 | 2411 |
| Topinambur einjährig Knolle | 13.10. | 20,1 | 556,0 | 300,0 | 58,2 | 1746 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 02.08. | 29,2 | 528,0 | 284,0 | 71,8 | 2039 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 16.08. | 30,2 | 533,0 | 285,0 | 89,3 | 2545 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 31.08. | 32,5 | 508,0 | 274,0 | 100,2 | 2745 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 21.08. | 25,4 | 601,0 | 326,0 | 158,0 | 5153 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 06.09. | 24,7 | 668,0 | 361,0 | 177,4 | 6406 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 15.09. | 33,4 | 692,0 | 373,7 | 202,5 | 7567 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 31.08. | 26,7 | 603,0 | 327,0 | 134,0 | 4382 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 06.09. | 30,1 | 597,0 | 324,0 | 156,2 | 5061 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 15.09. | 31,6 | 602,0 | 327,0 | 164,3 | 5373 |
| Luzerne Blühbeginn | 02.06. | 30,7 | 452,0 | 251,0 | 79,2 | 1988 |
| | 15.07. | 32,7 | 463,0 | 263,0 | 48,1 | 1265 |
| | 13.09. | 30,1 | 465,0 | 267,0 | 47,5 | 1268 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 460,0 | 260,3 | 174,6 | 4521 |
| Luzerne Vollblüte | 02.06. | 30,7 | 414,0 | 231,0 | 80,7 | 1864 |
| | 25.07. | 30,9 | 556,0 | 332,0 | 63,9 | 2122 |
| | 26.09. | 30,5 | 597,0 | 365,0 | 37,6 | 1372 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 522,3 | 309,3 | 174,6 | 5358 |

Tabelle 7: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Silagen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Dornburg 2006

| Substrat | Erntetermin 2006 | oTS-Gehalt (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|----------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 31.08. | 94,2 | 508,0 | 276,6 | 146,6 | 4055 |
| Mais PR38F53 | 12.09. | 96,2 | 526,8 | 287,3 | 161,4 | 4637 |
| Mais PR38F53 | 25.09. | 96,5 | 549,8 | 299,2 | 188,3 | 5634 |
| Mais Doge | 31.08. | 94,6 | 498,7 | 271,5 | 158,5 | 4303 |
| Mais Doge | 12.09. | 95,4 | 519,0 | 280,3 | 211,8 | 5937 |
| Mais Doge | 25.09. | 95,5 | 754,1 | 403,8 | 212,2 | 8569 |
| Sudangras Susu | 21.08. | 95,0 | 456,6 | 247,6 | 91,8 | 2273 |
| Sudangras Susu | 31.08. | 94,4 | 454,1 | 249,1 | 103,7 | 2583 |
| Sudangras Susu | 11.09. | 93,7 | 704,4 | 377,6 | 111,3 | 4203 |
| Zuckerhirse SuperSile 20 | 31.08. | 93,6 | 456,9 | 247,5 | 138,9 | 3438 |
| Zuckerhirse SuperSile 20 | 11.09. | 93,0 | 451,8 | 244,4 | 163,0 | 3984 |
| Zuckerhirse SuperSile 20 | 25.09. | 95,2 | 420,5 | 225,7 | 210,2 | 4744 |
| Zuckerhirse Rona | 11.09. | 94,2 | 411,4 | 222,4 | 95,1 | 2115 |
| Zuckerhirse Goliath | 11.09. | 94,9 | 424,1 | 227,2 | 288,8 | 6562 |
| Zuckerhirse SuperSile 18 | 31.08. | 92,9 | 455,6 | 246,3 | 131,1 | 3229 |
| Zuckerhirse SuperSile 18 | 11.09. | 94,0 | 452,6 | 245,2 | 184,2 | 4517 |
| Zuckerhirse SuperSile 18 | 25.09. | 93,3 | 418,2 | 226,6 | 155,0 | 3512 |
| Topinambur einjährig Kraut | 06.09. | 86,8 | 362,0 | 203,2 | 91,0 | 1849 |
| Topinambur einjährig Kraut | 15.09. | 88,9 | 363,6 | 202,1 | 131,4 | 2656 |
| Topinambur einjährig Kraut | 25.09. | 90,6 | 362,2 | 199,8 | 144,3 | 2883 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 02.08. | 91,6 | 365,9 | 199,4 | 71,8 | 1432 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 16.08. | 93,0 | 365,9 | 199,3 | 89,3 | 1780 |
| Topinambur mehrj. Kraut | 31.08. | 92,3 | 352,8 | 194,6 | 100,2 | 1950 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 31.08. | 89,6 | 592,9 | 324,0 | 157,9 | 5116 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 06.09. | 91,0 | 666,4 | 360,4 | 177,3 | 6390 |
| Durchw. Silphie, 3. J. | 15.09. | 87,7 | 596,1 | 324,2 | 202,5 | 6565 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 31.08. | 88,9 | 610,4 | 334,3 | 133,6 | 4466 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 06.09. | 89,5 | 598,0 | 325,5 | 156,2 | 5084 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 15.09. | 89,8 | 596,1 | 324,2 | 164,3 | 5323 |
| Luzerne Schröpschnitt | 02.06. | 91,6 | 411,0 | 225,4 | 80,8 | 1821 |
| Luzerne BB 2. Schnitt | 15.07. | 92,0 | 467,9 | 263,7 | 48,1 | 1268 |
| Luzerne BB 3. Schnitt | 13.09. | 89,8 | 464,6 | 265,2 | 47,5 | 1259 |
| Luzerne Schröpschnitt | 02.06. | 91,6 | 411,0 | 225,4 | 79,2 | 1785 |
| Luzerne VB 2. Schnitt | 25.07. | 92,1 | 478,9 | 271,2 | 63,9 | 1733 |
| Luzerne VB 3. Schnitt | 26.09. | 89,3 | 487,6 | 282,0 | 37,6 | 1060 |

Die in Abbildung 1 dargestellten Optimumerträge der Probeernten in den drei Versuchsjahren geben einen Überblick zur Anbauwürdigkeit der verschiedenen Energiepflanzen am Standort Dornburg im Vergleich zum „PR38F53“.

Es ist zu erkennen, dass der Energiemais „Doge“, die Durchwachsene Silphie, die Zuckerhirsen „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“, die Hirse „Goliath“ und das Luzernegras in ertraglicher Hinsicht mit dem Silomais konkurrieren können bzw. ihn teilweise sogar übertreffen. Die Ertragsleistung des Sudangrases „Susu“ war in starkem Maße von der Jahreswitterung abhängig und reagierte mit deutlich stärkeren Jahresschwankungen als die restlichen Prüfglieder.

Die Zuckerhirsen „Rona“, „Friggo“ und „Super Sile 15“ sind unter Dornburger Standortbedingungen zum Anbau als Kofermentpflanze nicht geeignet.

Topinambur im ein- und mehrjährigen Anbau, in den ersten beiden Versuchsjahren durchaus noch vergleichbar, sank aber im 3. Versuchsjahr völlig ab und ist zudem wegen der hohen Silierverluste problematisch.

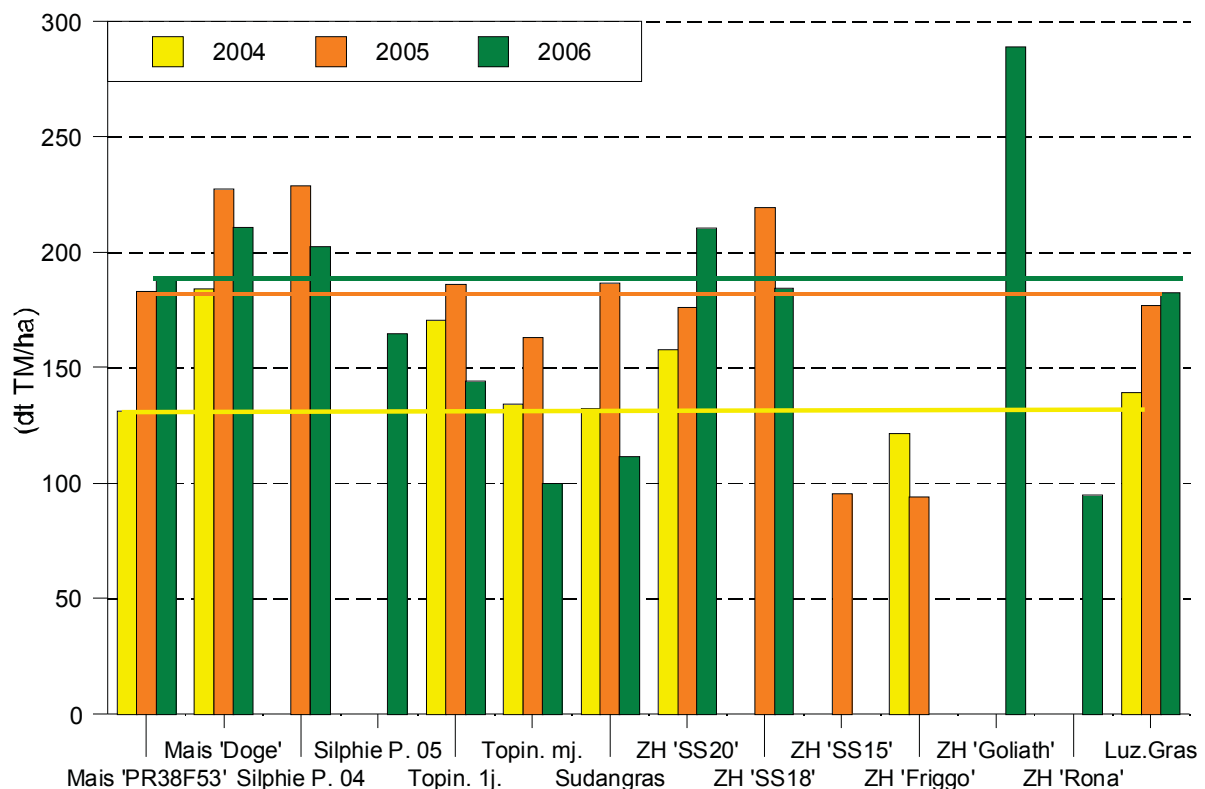


Abbildung 1: Biomasseerträge von Energiepflanzen – Optimum aus 3 Probeernten, VS Dornburg 2004 bis 2006

3.1.1.2 Gasaussbeuten der Minibatchversuche

Für die diskontinuierlichen Versuche im 1 l-Minibatch-Maßstab wurde ausschließlich siliertes Pflanzenmaterial vom Versuchsstandort Dornburg verwendet. Einzige Ausnahme bildete Klee-gras, welches vom Versuchsstandort Heßberg stammte.

Die Durchführung der Gärversuche erfolgte in vier Chargen, wobei als Referenzprobe jeweils 100 % Rindergülle, ohne Koferment, vergoren wurde.

Die gemessene Methanausbeute der reinen Rindergüllevergärung gilt als Basiswert (100 %), um eine Veränderung der Gasaussbeute unter Einsatz von Kofermenten zu erkennen (Tab. 8)

Tabelle 8: Methanausbeute (NI/kg oTS) unter Zusatz von Kofermenten

| Substrat/Koferment | Methanausbeute (NI/kg oTS) | Methanausbeute (% zu Gülle) | TM dt oTS/ha |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Rindergülle | 163,9 | 100 | |
| Zuckerhirse Friggo 1.PE | 271,4 | 165,6 | 112 |
| Zuckerhirse Friggo 2.PE | 325,4 | 198,6 | 109 |
| Zuckerhirse Friggo 3.PE | 244,4 | 149,6 | 94 |
| Zuckerhirse SS 20 1.PE | 270,5 | 165,1 | 146 |
| Zuckerhirse SS 20 2.PE | 344,5 | 210,2 | 136 |
| Zuckerhirse SS 20 3.PE | 358,3 | 218,6 | 114 |
| Rindergülle | 190,8 | 100 | |
| Mais PR38F53 1.PE | 294,6 | 155,0 | 126 |
| Mais PR38F53 2.PE | 284,8 | 149,8 | |
| Mais PR38F53 3.PE | 249,6 | 131,3 | |
| Mais Doge 1.PE | 365,7 | 192,4 | 158 |
| Mais Doge 2.PE | 396,4 | 208,6 | 123 |
| Mais Doge 3.PE | 351,1 | 174,7 | 120 |
| Kleegras | 282,3 | 148,5 | |
| Rindergülle | 241,4 | 100 | |
| Sudangras 1.PE | 367,7 | 206,0 | 108 |
| Sudangras 2.PE | 334,1 | 187,2 | 124 |
| Sudangras 3.PE | 302,1 | 169,2 | 100 |
| Luzernegras 1.PE | 340,9 | 191,1 | 40 |
| Luzernegras 2.PE | 299,2 | 167,6 | 36 |
| Luzernegras 3.PE | 291,7 | 163,5 | 40 |
| Rindergülle | 241,4 | 100 | |
| Topinambur Kraut mehrj. 1.PE | 366,23 | 152,0 | 117 |
| Topinambur Kraut mehrj. 2.PE | 356,5 | 148,0 | 121 |
| Topinambur Kraut mehrj. 3.PE | 402,5 | 167 | 77 |
| Topinambur Kraut einj. 1.PE | 326,6 | 135 | 122 |
| Topinambur Kraut einj. 2.PE | 333,23 | 138 | 147 |
| Topinambur Kraut einj. 3.PE | 348,4 | 144 | 112 |
| Topinambur Knolle einj. 1.PE | 388,1 | 161 | 14 |
| Topinambur Knolle einj. 2.PE | 275,1 | 114 | 21 |
| Topinambur Knolle einj. 3.PE | 353,3 | 146 | 62 |

Wie aus den Werten ersichtlich, wies die Zuckerhirse „Friggo“ in der 2. Probeernte sowohl die höchste Methanausbeute als auch den höchsten Methanertrag auf. Die Zuckerhirse „Super Sile 20“ hingegen verzeichnete den höchsten Ertrag in der 1. und die höchste Methanausbeute in der 3. PE. Die 2. PE erreichte aber auch gute Werte bezüglich Ertrag und Methanausbeute.

Bei der Maissorte „Doge“ ist die 1. PE zu favorisieren, obwohl die Methanausbeute in der 2. PE höher war. Ein höherer Ertrag überwog hier allerdings.

Die Maissorte „PR38F53“ zeigte in der 1.PE den höchsten Methanertrag. Eine Beziehung zum Ertrag kann nicht hergestellt werden, da die letzten beiden Ernten einem Wildschaden zum Opfer fielen und nur noch Pflanzenmaterial zur Silierung zur Verfügung stand.

Klee- und Luzernegras werden im 2. Projektjahr näher untersucht, da die Versuche im 1. Jahr nur einen Schnitt zuließen, was ein aussagefähiges Ergebnis nicht möglich macht. Zu erkennen ist nur, dass bei Luzernegras die Methanausbeute mit jeder Probeernte rückläufig ist und der Ertrag fast stabil bleibt.

Die Topinambursorte „Lola“ unterschied sich bei den Ernteterminen im ersten von drei Anbaujahren nicht wesentlich hinsichtlich Methanausbeute und Ertrag. Die Sorte „Gute Gelbe“ hingegen wies einen hohen Ertrag in der 2. und die beste Methanausbeute in der 3. PE aus. Die dazugehörigen Knollen dieser als einjährige Kultur angebauten Art hatten in der 3. PE den höchsten Ertrag und eine mittlere Methanausbeute. Es empfiehlt sich demzufolge die Ernte als Ganzpflanze für die Verarbeitung in einer Biogasanlage, wenn dies verfahrenstechnisch realisierbar ist.

3.1.1.3 Gasausbeuten der Batchversuche

Die Tabellen 9 und 10 beinhalten eine Zusammenstellung der TS- und oTS-Gehalte der Rindergülle sowie der eingesetzten Kosubstrate.

Tabelle 9: TS- und oTS-Werte der Rindergülle vom 23.01.2006

| | TS-Gehalt (%) | oTS-Gehalt bezogen auf TS (%) | oTS-Gehalt bezogen auf OS (%) |
|------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Probe 1 | 8,8 | 84,03 | 7,35 |
| Probe 2 | 8,8 | 86,61 | 7,53 |
| Probe 3 | 8,6 | 84,19 | 7,28 |
| Mittelwert | 8,7 | 84,95 | 7,38 |

Tabelle 10: TS- und oTS-Werte der Kosubstrate

| | TS-Gehalt (%) | oTS-Gehalt bezogen auf TS (%) | oTS-Gehalt bezogen auf OS (%) |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Mais PR38F53 | | | |
| Probe 1 | 25,4 | 95,43 | 24,27 |
| Probe 2 | 25,2 | 95,21 | 24,02 |
| Probe 3 | 25,5 | 95,79 | 24,44 |
| Mittelwert | 25,4 | 95,48 | 24,24 |
| Mais Doge | | | |
| Probe 1 | 21,0 | 94,51 | 19,86 |
| Probe 2 | 19,9 | 94,06 | 18,72 |
| Probe 3 | 20,2 | 94,36 | 19,11 |
| Mittelwert | 20,4 | 94,31 | 19,23 |
| Sudangras Susu | | | |
| Probe 1 | 25,8 | 93,93 | 24,22 |
| Probe 2 | 26,0 | 94,30 | 24,51 |
| Probe 3 | 26,1 | 94,42 | 24,67 |
| Mittelwert | 26,0 | 94,22 | 24,46 |
| Zuckerhirse Friggo | | | |
| Probe 1 | 21,4 | 90,22 | 19,31 |
| Probe 2 | 21,6 | 90,69 | 19,58 |
| Probe 3 | 21,4 | 91,21 | 19,51 |
| Mittelwert | 21,5 | 90,71 | 19,47 |
| Zuckerhirse Super Sile | | | |
| Probe 1 | 21,6 | 92,26 | 19,90 |
| Probe 2 | 21,1 | 92,45 | 19,52 |
| Probe 3 | 21,2 | 92,11 | 19,55 |
| Mittelwert | 21,3 | 92,27 | 19,66 |
| Topinambur | | | |
| Probe 1 | 23,7 | 90,03 | 21,32 |
| Probe 2 | 23,5 | 93,16 | 21,91 |
| Probe 3 | 23,6 | 89,72 | 21,18 |
| Mittelwert | 23,6 | 90,97 | 21,47 |

Es fällt auf, dass der Gehalt an oTS, bezogen auf TS, bei den eingesetzten Kosubstraten immer über 90 % liegt, während in Rindergülle nur etwa 85 % zu finden sind. Die Ursache hierfür ist die bereits stattgefunden biologische Verwertung der organischen Bestandteile in der Rindergülle. Damit wurde zum einen der Gehalt an anorganischer Trockensubstanz (Asche) erhöht, zum anderen sind die besonders gut verwertbaren Bestandteile im Verdauungstrakt des Rindes verblieben, so dass nur schwerer aufschließbare Teile in die Gülle gelangen. Weiterhin sei noch auf thermisch zersetzliche anorganische Komponenten (Harnstoff u. ä.) verwiesen, welche fälschlicherweise in den oTS-Anteil eingerechnet werden und so zu einem überhöhten oTS-Wert führen können.

Ergebnisse der Gärversuche nach Abzug des Impfschlammanteils

Die Ergebnisse der Vergärung von Rindergülle im 20 l-Batchfermenter sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei Rindergüllevergärung verdeutlicht Abbildung 2.

Tabelle 11: Vergärung von Rindergülle

| Parameter | Dimension | Fermenter 1 |
|---|--|-------------|
| Biogasmenge | I_N | 20 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 182 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 13 |
| Methanmenge | I_N | 13 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 117 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 9 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 58 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 4 |

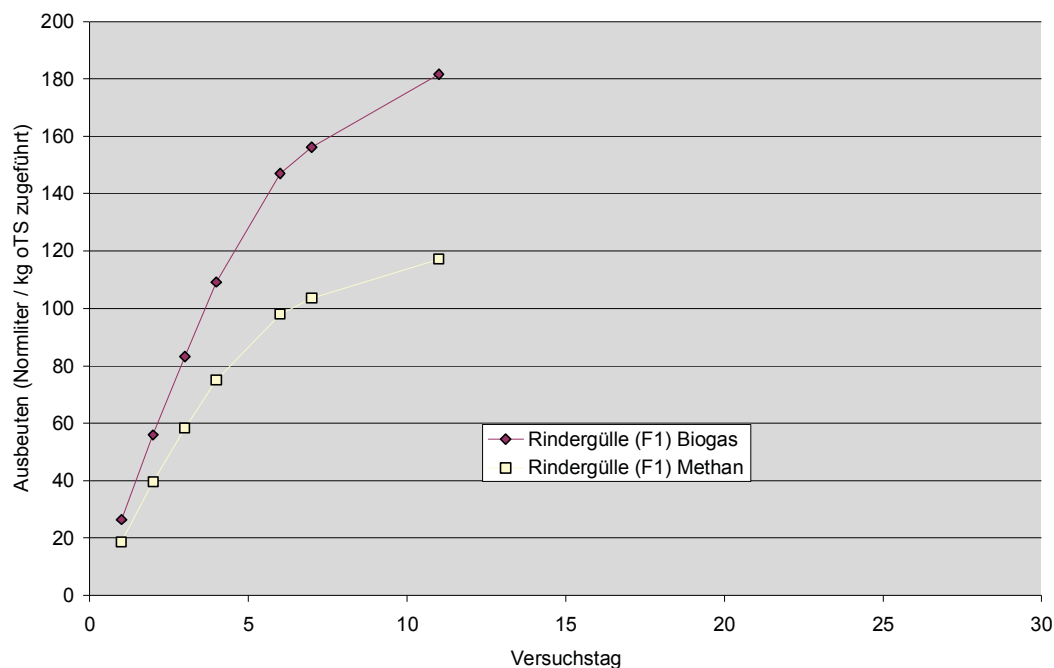


Abbildung 2: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Vergärung von Rindergülle im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS

Die in Abbildung 2 dargestellten Kurven der Biogas- und Methanproduktion zeigen, dass nach dem 11. Tag keine unter den verfügbaren Bedingungen messbaren Biogasmengen mehr entstanden. Da das genutzte Messgerät eine Mindestmenge an Gas benötigt, um zu realistischen Werten zu gelangen, muss bei der Vergärung von Rindergülle ein Fehler über die Gesamtzeit mit einkalkuliert werden. Jedoch wird bei genauerer Betrachtung der Werte auch deutlich, dass die gebildete Biogasmenge bis zum 11. Tag bereits wesentlich geringer ist als bei den folgenden Versuchen zur Kofermentation von Rindergülle und variablem Kosubstrat.

Der Verlust, welcher durch die nur sehr geringe Biogasbildung aus Rindergülle bis zum 30. Tag eingetreten ist, wird auf 10 bis 20 % noch gebildetes Gas geschätzt, welches durch die extrem langen Standzeiten in dem Gasmessbeutel nicht mehr zu bestimmen war, da Diffusionsverluste eine exakte Bestimmung nicht mehr gestatteten.

In den folgenden Tabellen und Abbildungen sind die Ergebnisse der Kofermentation von Rindergülle mit den vom Auftraggeber vorgegebenen Pflanzenmaterialien zusammengestellt. Auf eine Darstellung von Mittelwerten wurde bewusst verzichtet, da die gefundenen Abweichungen in der Natur der Materialien liegen oder (in einem Fall) ein Messfehler zu diskutieren ist.

Kovergärung Rindergülle und Mais „Doge“ – 20 l-Batchfermenter (Tab. 12, Abb. 3)

(oTS-Verhältnis Rindergülle : Mais „Doge“ = 80 : 20)

Tabelle 12: Vergärung von Rindergülle und Mais „Doge“

| Parameter | Dimension | Fermenter 2 | Fermenter 3 |
|---|--|-------------|-------------|
| Biogasmenge | I_N | 69 | 63 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 605 | 552 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 51 | 46 |
| Methanmenge | I_N | 40 | 36 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 352 | 319 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 30 | 27 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 58 | 58 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | Ppm | 0 | 0 |

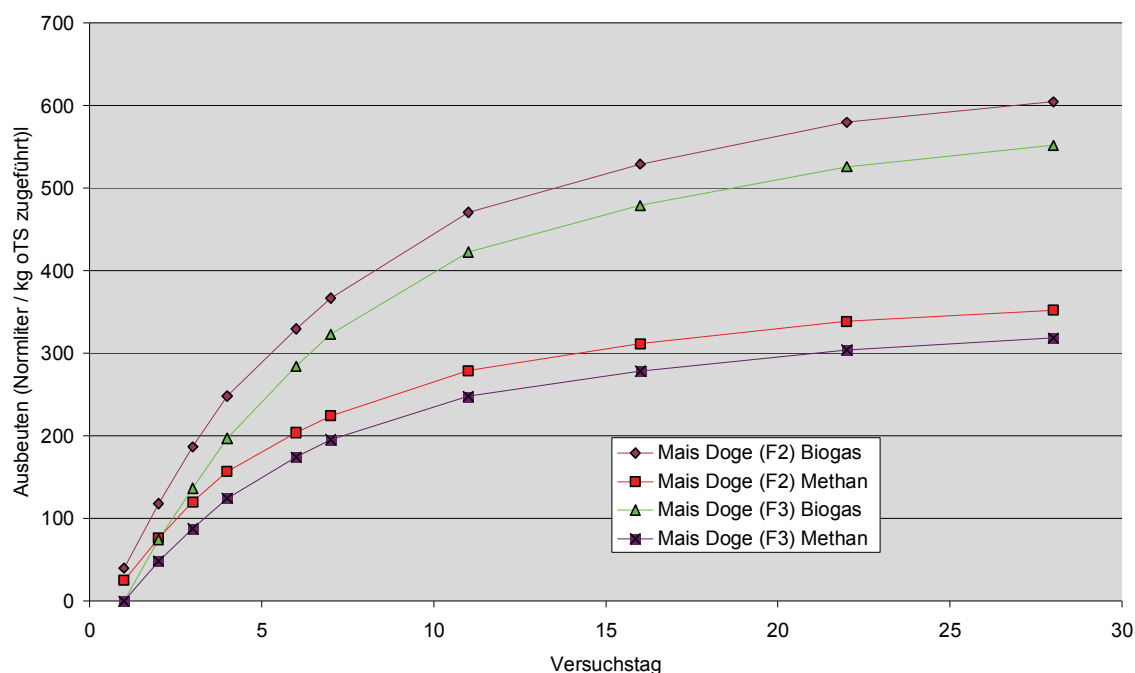


Abbildung 3: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Mais „Doge“ im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Mais „Doge“ = 80 : 20)

Offensichtlich werden durch Inhomogenitäten im Kosubstrat in beiden Fermentern unterschiedliche Biogasmengen gebildet. Besonders die Maissorte „Doge“ zeigt Abweichungen der Summenkurven über den Versuchsverlauf. Deren Hauptursache sollte in der Zusammensetzung der Silage zu suchen sein, da bei der Versuchsvorbereitung kaum zwischen Stängel-, Blatt- und Korn-/Kolbenmaterial unterschieden werden kann. Nur eine wesentlich höhere Datendichte würde eine Verdichtung der Messwerte (Kurvenschar) und eine verlässliche Bestimmung eines Durchschnittswertes erlauben. Jedoch liegen die ermittelten Werte für beide Maissorten im Bereich der Literaturangaben.

Kovergärung Rindergülle und Mais „PR38F53“ – 20 l-Batchfermenter (Tab.13, Abb. 4)
(oTS-Verhältnis Rindergülle : Mais „PR38F53“ = 80 : 20)

Tabelle 13: Vergärung von Rindergülle und Mais „PR38F53“

| Parameter | Dimension | Fermenter 4 | Fermenter 5 |
|---|--|-------------|-------------|
| Biogasmenge | I_N | 70 | 69 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 609 | 602 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 52 | 52 |
| Methanmenge | I_N | 40 | 40 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 351 | 349 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 30 | 30 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 58 | 58 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 0 | 0 |

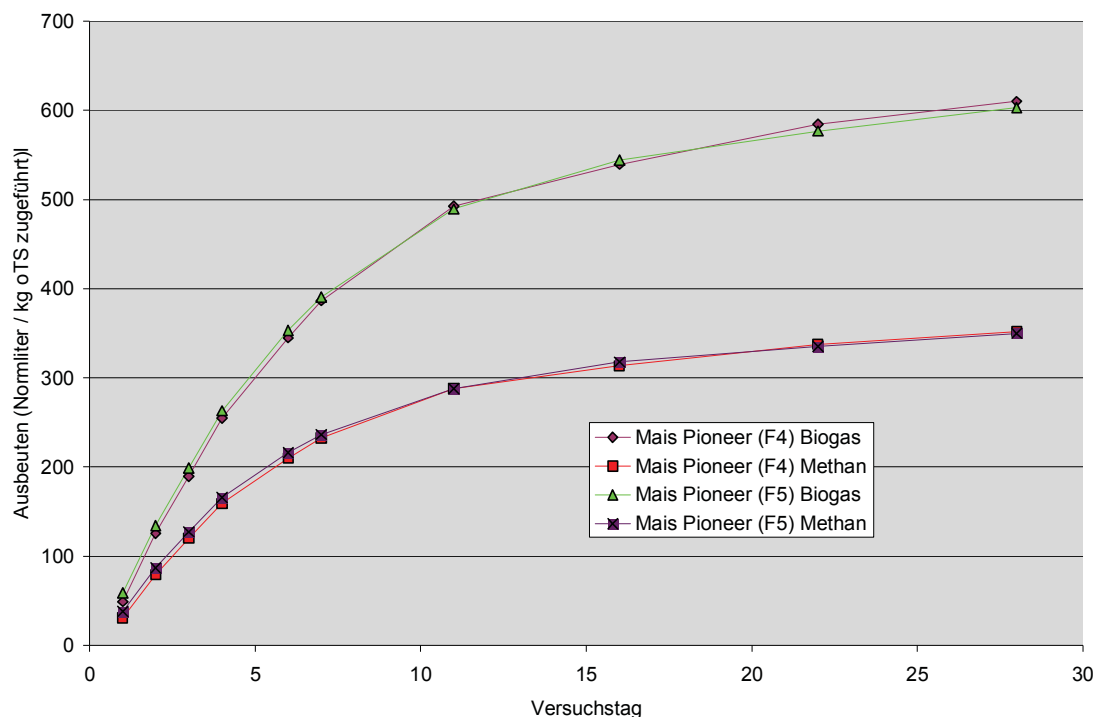


Abbildung 4: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Mais „PR38F53“ im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Mais „PR38F53“ = 80 : 20)

Kovergärung Rindergülle und Sudangras „Susu“ – 20 l-Batchfermenter (Tab. 14, Abb. 5)
(oTS-Verhältnis Rindergülle : Sudangras „Susu“ = 80 : 20)

Tabelle 14: Vergärung von Rindergülle und Sudangras „Susu“

| Parameter | Dimension | Fermenter 6 | Fermenter 7 |
|---|--|-------------|-------------|
| Biogasmenge | I_N | 80 | 78 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 698 | 682 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 60 | 58 |
| Methanmenge | I_N | 46 | 45 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 405 | 397 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 35 | 34 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 58 | 58 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 0 | 0 |

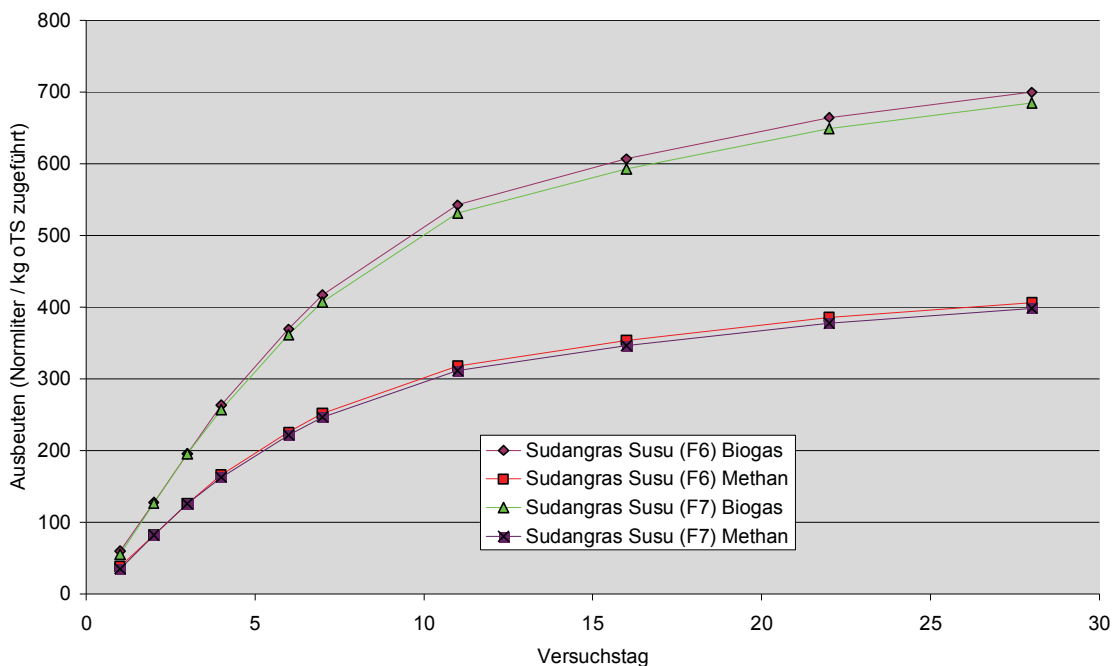


Abbildung 5: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Sudangras „Susu“ im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Sudangras „Susu“ = 80 : 20)

Die gefundenen geringen Abweichungen zwischen den Kurvenverläufen lassen sich auf einen Messfehler am Tag 11 bei der Untersuchung der Gasprobe aus Fermenter 7 zurückführen. Da die Werte bei den folgenden Messungen wieder identisch waren, verlaufen die Kurven parallel bis zum Ende der Versuchsperiode.

Damit sollten die Messdaten aus dem Fermenter 6 in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden, weil sie realistischer und weniger fehlerbehaftet scheinen. Die bei dieser Messung bestimmten Biogasausbeuten waren die höchsten der in der Messreihe festgestellten Werte.

Kovergärung Rindergülle und Hirse „Super Sile 20“ – 20 l-Batchfermenter (Tab. 15, Abb. 6) (oTS-Verhältnis Rindergülle : Zuckerhirse „Super Sile 20“ = 80 : 20)

Tabelle 15: Vergärung von Rindergülle und Zuckerhirse „Super Sile 20“

| Parameter | Dimension | Fermenter 8 | Fermenter 9 |
|---|--|-------------|-------------|
| Biogasmenge | I_N | 70 | 73 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 616 | 638 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 52 | 54 |
| Methanmenge | I_N | 40 | 42 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 356 | 372 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 30 | 31 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 58 | 58 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 0 | 0 |

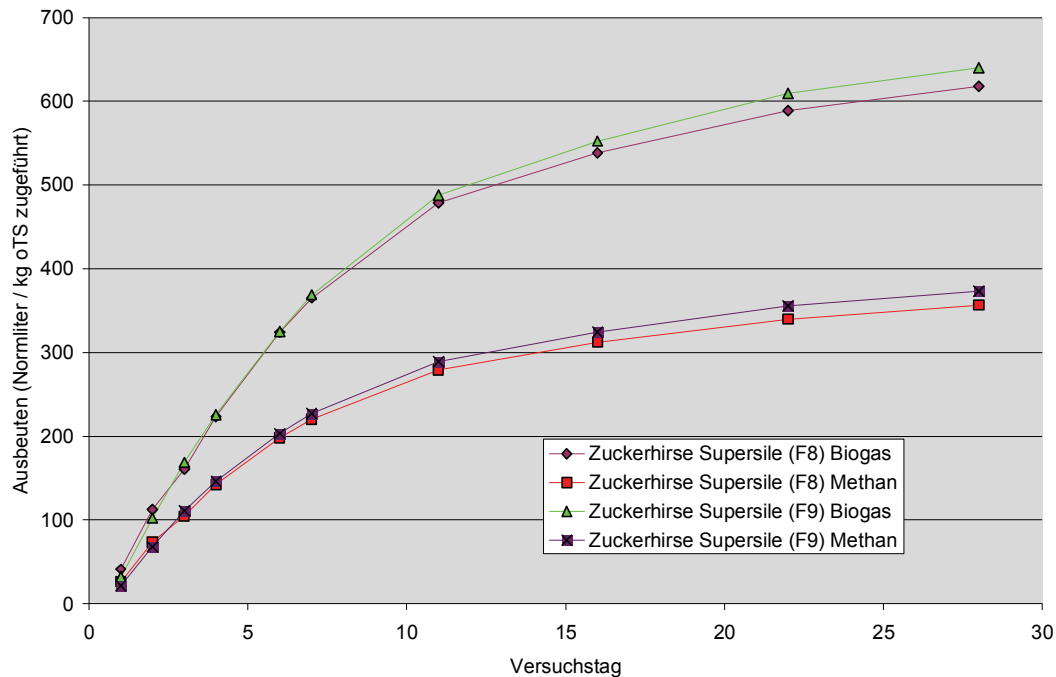


Abbildung 6: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Zuckerhirse „Super Sile 20“ im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Zuckerhirse „Super Sile 20“ = 80 : 20)

Die Messdaten der beiden Fermentationen von Zuckerhirse in diesem wie im folgenden Versuch sind weitgehend identisch, was auf ein fast homogenes und gut verwertbares Material schließen lässt. Da jedoch die Ausbeuten an Biogas etwas unterschiedlich sind (620 zu 660 Normliter/kg oTS), ist hier ein Einfluss des Pflanzenmaterials zu vermuten, der nicht durch die Fermentation zu beeinflussen ist.

Kovergärung Rindergülle und Zuckerhirse „Friggo“ – 20 l-Batchfermenter (Tab. 16, Abb. 7)
(oTS-Verhältnis Rindergülle : Zuckerhirse „Friggo“ = 80 : 20)

Tabelle 16: Vergärung von Rindergülle und Zuckerhirse „Friggo“

| Parameter | Dimension | Fermenter 10 | Fermenter 11 |
|---|--|--------------|--------------|
| Biogasmenge | I_N | 75 | 76 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 661 | 663 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 56 | 56 |
| Methanmenge | I_N | 44 | 45 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 391 | 392 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 33 | 33 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 59 | 59 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 8 | 6 |

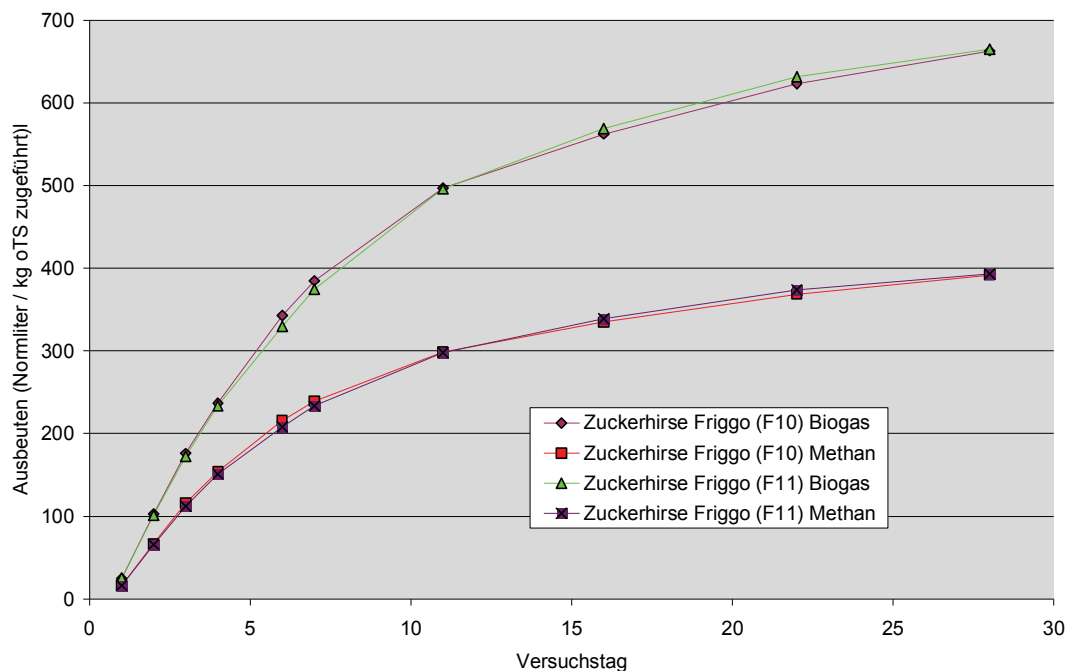


Abbildung 7: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Zuckerhirse „Friggo“ im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Zuckerhirse „Friggo“ = 80 : 20)

Auch hier ist eine sehr gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe festzustellen, die zeigt, dass ein gut verwertbares, homogenes Material vorliegt. Tendenziell scheinen die Biogas- und Methanausbeuten bei der Sorte „Friggo“ etwas höher zu liegen als bei der Sorte „Super Sile 20“. Endgültige Aussagen dazu sollten jedoch erst nach weiteren Versuchen getroffen werden.

Kovergärung Rindergülle und Topinamburknollen – 20 l-Batchfermenter (Tab. 17, Abb. 8) (oTS-Verhältnis Rindergülle : Topinamburknollen = 80 : 20)

Tabelle 17: Vergärung von Rindergülle und Topinamburknollen

| Parameter | Dimension | Fermenter 12 | Fermenter 13 |
|---|--|--------------|--------------|
| Biogasmenge | I_N | 74 | 73 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 650 | 640 |
| Biogasausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 55 | 54 |
| Methanmenge | I_N | 44 | 43 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg oTS}_{zu}$ | 384 | 380 |
| Methanausbeute | $I_N/\text{kg OS}_{zu}$ | 33 | 32 |
| durchschnittlicher Methangehalt | % | 59 | 59 |
| durchschnittlicher H_2S -Gehalt | ppm | 0 | 0 |

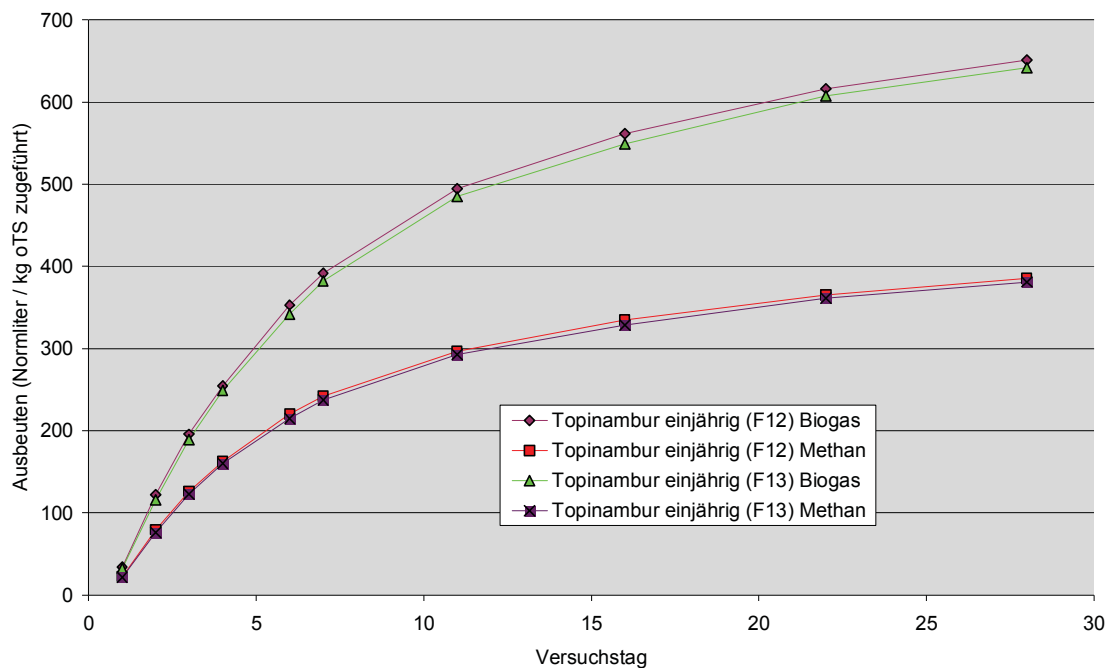


Abbildung 8: Zeitabhängigkeit der Biogas- und Methanbildung bei der Kovergärung von Rindergülle und Topinambur einjährig im 20 l-Batchfermenter bez. auf Normliter/kg oTS (oTS-Verhältnis Rindergülle : Topinambur, einjährig = 80 : 20)

Ebenso wie die Werte aus den Fermentationsversuchen von Zuckerhirse stimmen auch bei Topinambur die Messwerte beider Versuche über den gesamten Kurvenverlauf sehr gut überein.

Bemerkenswert ist, dass die Methangasgehalte aller untersuchten Substrate im Bereich knapp unter 60 % liegen, was zum einen zeigt, dass neben dem pflanzlichen Eiweiß in erster Linie Kohlenhydrate in den Stoffwechsel einbezogen sind und dass zum anderen die Kohlenhydratverwertung vergleichsweise geringe Methangehalte im Biogas liefert, was rein vom Chemismus her absolut verständlich erscheint.

Betrachtungen zum oTS-Abbau in den diskontinuierlichen Gärversuchen

Der oTS-Abbau im Gärsubstrat wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden bestimmt. Zum einen wurden die gemessenen Gasvolumina in Mengen umgerechnet und diese in Beziehung zur eingesetzten oTS gesetzt. Zum anderen wurde die im Gärrest verbliebene oTS bestimmt und dieser Wert genutzt, um den oTS-Abbau zu verifizieren (Tab. 18).

Beide Verfahren sind nicht fehlerfrei und es ist erforderlich eine Reihe von Annahmen bzw. Bedingungen den Bestimmungen zu Grunde zu legen, welche im Folgenden zusammengestellt sind:

- Der Masseverlust durch Biogasbildung aus dem Impfschlammanteil sowie die oTS-Änderung im Impfschlammanteil sind in der Gesamtmenge des Gärsubstrates zu vernachlässigen.
- Das entstehende Biogas besteht nur aus Kohlendioxid und Methan. Spurengase werden vernachlässigt.

- Wasserverluste (als Wasserdampf) werden ebenfalls vernachlässigt.
- Das eingewogene Material ist stets homogen und identisch mit dem eingesetzten Material bzw. mit dem Gärrückstand.
- Der Verlust an organischem Material bei der TS-Bestimmung wird vernachlässigt.

Tabelle 18: Vergleich der Werte des oTS-Abbaus - ermittelt über Gasausbeute und über die oTS-Messung des Gärrückstands (oTS-Verhältnis Rindergülle : Kosubstrat = 80 : 20)

| | oTS-Abbau [%] über Gasmenge | oTS-Abbau [%] über Gärrückstand |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| F1 – Rindergülle (RG) | 18,9 | 73,8 |
| F2 – RG + Mais Doge | 72,0 | 79,3 |
| F3 – RG + Mais Doge | 66,1 | 80,4 |
| F4 – RG + Mais Pioneer | 73,1 | 77,1 |
| F5 – RG + Mais Pioneer | 72,1 | 75,9 |
| F6 – RG + Sudangras Susu | 83,5 | 80,7 |
| F7 – RG + Sudangras Susu | 81,6 | 80,6 |
| F8 – RG + Zuckerhirse Super Sile | 73,9 | 79,4 |
| F9 – RG + Zuckerhirse Super Sile | 76,1 | 79,4 |
| F10 – RG + Zuckerhirse Friggo | 78,2 | 79,4 |
| F11 – RG + Zuckerhirse Friggo | 78,4 | 78,3 |
| F12 – RG + Topinambur | 77,0 | 74,9 |
| F13 – RG + Topinambur | 75,6 | 73,7 |

Der oTS-Abbau bei reiner Rindergülle erscheint bei der Berechnung über die Gasmenge als zu niedrig, jedoch ist die bis zum 11. Tag gemessene Gasmenge bereits bedeutend geringer (etwa 40 %) als in den Versuchen zur Kofermentation. Bei einer Addition des Bestimmungsfehlers, welcher der Gasmenge von 20 % entsprechen würde, ist lediglich mit einer Zunahme des Abbaus von etwa 18 auf 23 % zu rechnen.

Es wird eingeschätzt, dass selbst bei einem höheren Fehler bei der Gasmessung im Fermenter 1 der oTS-Abbau über die Gasmenge genauer zu bestimmen ist, als über den Gärrückstand. Das wird insbesondere an dem viel zu hohen Wert für den Abbau von Rindergülle deutlich. Eine Erklärung für diesen zu hohen Wert konnte noch nicht befriedigend gegeben werden, jedoch erscheint der kleinere Wert logisch, da die Inhaltsstoffe der Rindergülle bereits als verdaut gelten müssen und so ein wesentlich weniger gehaltvolles Substrat zur Verfügung steht.

Für die diskontinuierlichen Versuche im 20 l-Batch-Maßstab wurde ausschließlich siliertes Pflanzenmaterial vom Versuchsstandort Dornburg verwendet. Die Durchführung der Gärversuche erfolgte in einer Charge, wobei als Referenzprobe 100 % Rindergülle, ohne Koferment, vergoren wurde.

Als Basiswert wird wieder die reine Rindergüllevergärung angesehen und zu 100 % gesetzt, um eine Veränderung der Gasausbeute unter Einsatz von Kofermenten zu erkennen (Tab. 19).

Tabelle 19: Methanausbeute (NI/kg oTS) unter Zusatz von Kofermenten

| Substrat/Koferment | Methanausbeute (NI/kg oTS) | Methanausbeute (% zu Gülle) | TM dt oTS/ha | Methananstieg zu 100% RG |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Rindergülle | 117 | 100 | | |
| Zuckerhirse Friggo 2.PE | 335 | 286 | 94 | 17484 |
| Zuckerhirse SS 20 2.PE | 350 | 299 | 162 | 32238 |
| Mais PR38F53 2.PE | 401 | 342 | 170 | 41140 |
| Mais Doge 2.PE | 364 | 311 | 213 | 44943 |
| Sudangras 2.PE | 391 | 334 | 200 | 46800 |
| Topinambur Kraut inj. 2.PE | 382 | 326 | 55 | 12430 |

Als Möglichkeit der Auswertung der Gärversuche wird die prozentuale Veränderung der Methanausbeute unter dem Gesichtspunkt des verhältnismäßigen Austausches, berechnet auf die oTS von Rindergülle, durch ein Koferment gesehen.

Wie aus den Werten des zuzüglichen Methananstieges zu 100 % Rindergülle (RG) ersichtlich ist, wies Sudangras die positivste Ertragsausbeute auf. Die beiden Maissorten lagen nur wenig darunter, wobei der Mais „Doge“ noch bessere Ausbeuten hatte als der Energiemais „PR38F53“. Bei Zugrundelegung der Ertragsergebnisse des Standortes Müllheim, wo der Ertrag beim Mais „Doge“ bei 266,5 dt oTS/ha lag, ergäbe sich, bei prozentual gleichen organischen Inhaltsstoffen, eine Methanausbeute von 56231 NI Methan je Hektar Anbaufläche. Die Zuckerhirse „Super Sile 20“ erreichte noch akzeptable Methanausbeuten, wohingegen die Zuckerhirse „Friggo“ und auch Topinamburknollen auf Grund ihrer geringen Ernteerträge für den Einsatz als Koferment wenig geeignet sind.

Topinamburknollen wären nur wirtschaftlich, wenn diese zusammen mit dem Topinamburkraut siliert und verarbeitet werden würden. Die Verschmutzung der Knollen birgt aber große Gefahren für den technischen und technologischen Ablauf im Biogasreaktor.

3.1.1.4 Gasausbeuten der kontinuierlichen Versuche

Eine Zusammenstellung der TS und oTS-Werte der eingesetzten Rohstoffe beinhalten die Tabellen 20 und 21.

Tabelle 20: TS- und oTS- Werte der Rindergülle vom 23.01.2006

| | TS-Gehalt in % | oTS-Gehalt bezogen auf TS in % | oTS-Gehalt bezogen auf OS in % |
|------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Probe 1 | 8,8 | 84,03 | 7,35 |
| Probe 2 | 8,7 | 86,61 | 7,53 |
| Probe 3 | 8,6 | 84,19 | 7,28 |
| Mittelwert | 8,7 | 84,95 | 7,38 |

Tabelle 21: TS- und oTS-Werte der Kosubstrate

| | TS-Gehalt in % | oTS-Gehalt bezogen auf TS in % | oTS-Gehalt bezogen auf OS in % |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Lucerne | | | |
| Probe 1 | 28,3 | 90,63 | 25,63 |
| Probe 2 | 28,8 | 90,48 | 26,09 |
| Probe 3 | 28,6 | 90,71 | 25,95 |
| Mittelwert | 28,6 | 90,60 | 25,88 |
| Durchwachsene Silphie | | | |
| Probe 1 | 26,8 | 90,30 | 24,18 |
| Probe 2 | 27,0 | 90,29 | 24,42 |
| Probe 3 | 27,1 | 90,70 | 24,61 |
| Mittelwert | 27,0 | 90,43 | 24,41 |
| Topinambur | | | |
| Probe 1 | 41,3 | 94,67 | 39,10 |
| Probe 2 | 41,8 | 94,05 | 39,33 |
| Probe 3 | 41,6 | 93,80 | 38,97 |
| Mittelwert | 41,6 | 94,17 | 39,14 |

Versuchsdurchführung und Ergebnis der Versuche zum kontinuierlichen anaeroben Abbau von Rindergülle in Gegenwart verschiedener Kosubstrate

Über einen Zeitraum von 60 Tagen (30.01.06 – 31.03.06) wurde pro Substrat jeweils ein 150 l-Bioreaktor (Abb. 9) mit Rindergülle und dem jeweiligen Kosubstrat beschickt. Die täglich zugeführte Substratmischung bestand zu 80 % oTS aus der Rindergülle und 20 % oTS aus dem jeweiligen Kosubstrat. Das Reaktionsvolumen betrug 120 l. Die Kofermentation erfolgte mit einer Faulraumbelastung von etwa 2 kg oTS/(m³ x d) und mit einer Verweilzeit von 40 Tagen. Der Rührer drehte sich ständig mit einer Drehzahl von 8 U / min.



Abbildung 9: Bioreaktoren zur Durchführung von kontinuierlichen Versuchen zum anaeroben Abbau von Biomasse (Nutzvolumen: 120 l, T = 37 °C)

Aus den Daten der Tabellen 20 und 21 und den Vorgaben der TLL wurden die Zusammensetzungen der Fermentationsmischungen (Wasser und Impfschlamm) zu Beginn des Versuches

festgelegt. Im Verlauf der Untersuchungen wurden täglich 3 kg Material entnommen und durch 3 kg frisches Material (Kosubstrat, Rindergülle, Wasser) ersetzt (Tab. 22).

Tabelle 22: Zusammensetzung der Fermentationsmischungen zu Beginn des Versuches

| | Luzerne Fermenter 1 | Durchwachsene Silphie Fermenter 2 | Topinambur Fermenter 3 |
|----------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Impfschlamm | 60 kg | 60 kg | 60 kg |
| Wasser | 57 kg | 57 kg | 57 kg |
| tägliche Beschickung | | | |
| Kosubstrat | 185 g | 197 g | 123 g |
| Rindergülle | 2601 g | 2601 g | 2601 g |
| Wasser | 214 g | 214 g | 214 g |

In Abbildung 10 sind die täglichen Ausbeuten an Biogas und Methan zusammengestellt. Trotz der prozessbedingten Schwankungen ist ein Trend zuerkennen, welcher sich auch in den in Abbildung 11 gezeigten CH_4 - zu CO_2 -Verhältnissen und den in Tabelle 23 zusammengestellten Durchschnittswerten widerspiegelt.

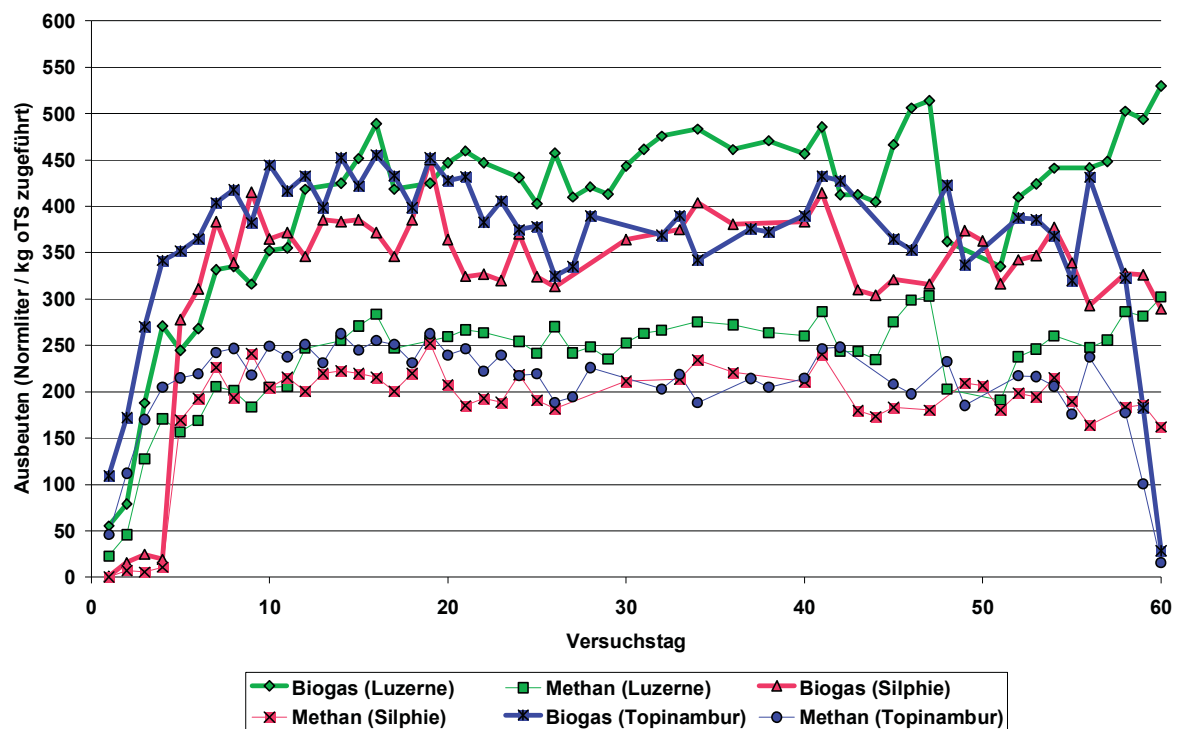


Abbildung 10: Tägliche Ausbeuten von Biogas und Methan im Verlauf des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

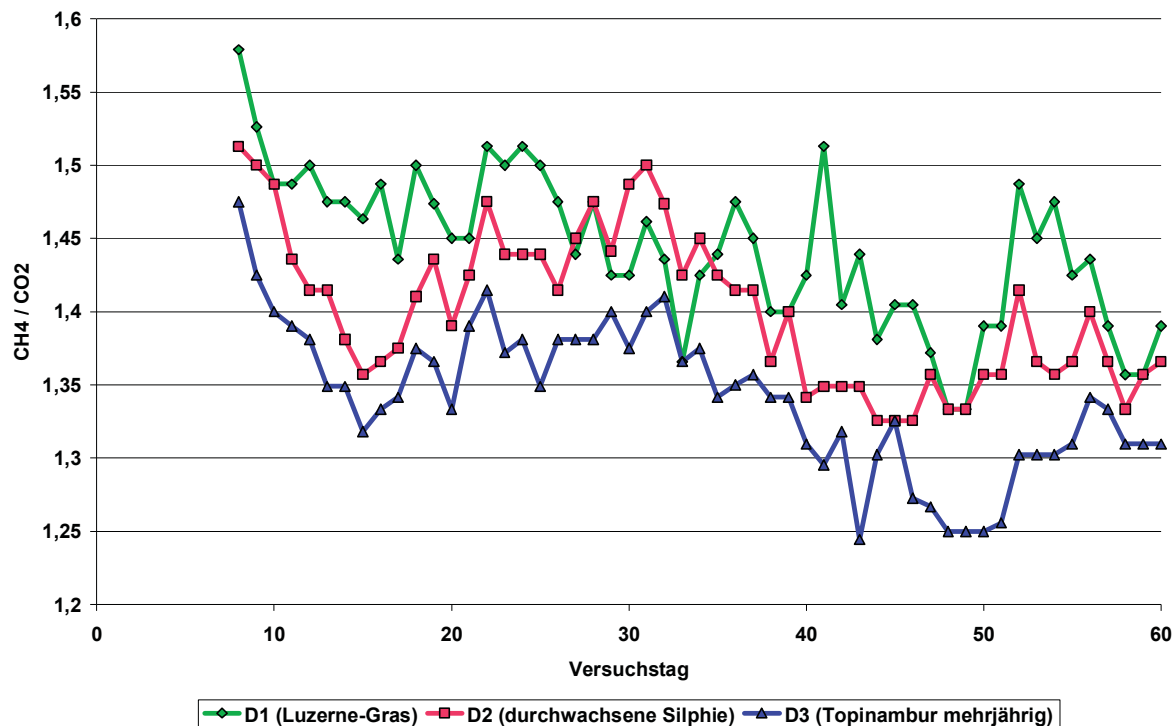


Abbildung 11: CH_4 - zu CO_2 -Verhältnisse im Verlauf des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

Aus Abbildung 10 geht hervor, dass das Verhältnis von Methan zu Kohlendioxid über die Versuchslaufzeit langsam absinkt, was mit der Auswaschung von Impfschlamm in Verbindung gebracht werden kann. Über den Verlauf des Versuches wird noch keine Konstanz erreicht, wobei andererseits festzustellen ist, dass lediglich ein geringer Abfall messbar ist (Maßstab der y-Achse). Das beste Ergebnis wird beim Abbau von Luzerne erhalten, was eindeutig mit den Inhaltsstoffen in Zusammenhang steht.

Tabelle 23: Tagesdurchschnittswerte von Gasmenge und Gaszusammensetzung des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

| | Luzerne Fermenter 1 | Durchwachsene Silphie Fermenter 2 | Topinambur Fermenter 3 |
|--|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Durchschnittliche Biogasausbeute [l _{norm} /kg _{oTS} zugeführt] | 403 | 323 | 366 |
| Durchschnittliche Methanausbeute [l _{norm} /kg _{oTS} zugeführt] | 236 | 185 | 209 |
| Durchschnittlicher Methangehalt [%] | 60 | 59 | 58 |
| Durchschnittlicher Schwefelwasserstoff-Gehalt [ppm] | 672 | 544 | 509 |

Tendenziell wird aus dem Kosubstrat Luzerne eine größere Menge hochwertigeres Biogas gebildet als aus den beiden anderen Materialien. Da über Synergieeffekte beim Abbau von Kosubstraten mit Rindergülle bisher nicht berichtet wurde, ist davon auszugehen, dass der Anteil der Rindergülle an der Gasausbeute in allen Fällen gleich groß ist und die Unterschiede auf

das Kosubstrat zurückzuführen sind. Dabei sollten insbesondere die Unterschiede im durchschnittlichen Methangehalt nicht überbewertet werden, da diese Werte im Fehlerbereich der Messmethode liegen und erst nach Validierung der Analysenmethoden und/oder durch eine höhere Versuchsichte bestätigt werden können. Die Unterschiede im Schwefelwasserstoffgehalt des Biogases zeigen jedoch, dass beim anaeroben Abbau von Luzerne mehr Protein verwertet wird als beim Abbau von Topinambur, was in der Zusammensetzung der Kosubstrate begründet sein könnte. Möglicherweise enthält Topinambur mehr Stärke, welche ein Biogas liefert, das weniger Methan aber auch weniger Schwefelwasserstoff enthalten dürfte.

Der eigentliche Verlauf des anaeroben Abbaus der drei untersuchten Gemische ist nahezu identisch, wie die beiden folgenden Abbildungen des Verlaufs von pH-Wert und FOS/TAC-Wert zeigen (Abb. 12 und 13).

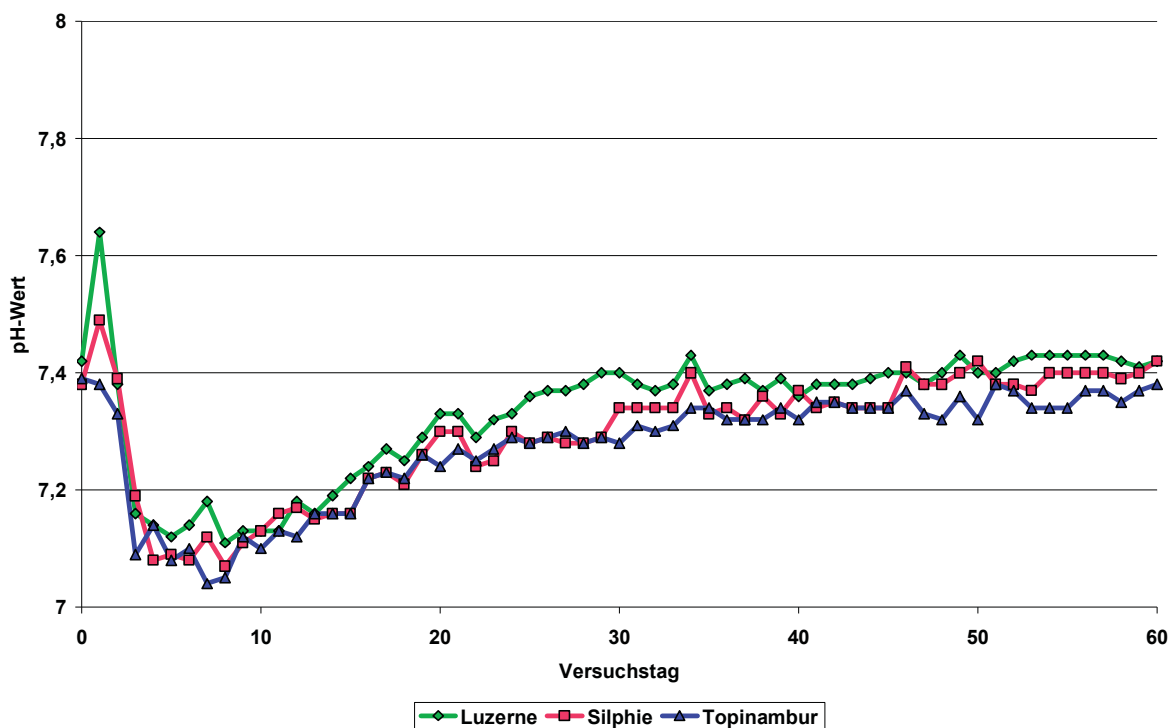


Abbildung 12: pH-Wert des Gärrückstandes im Verlauf des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

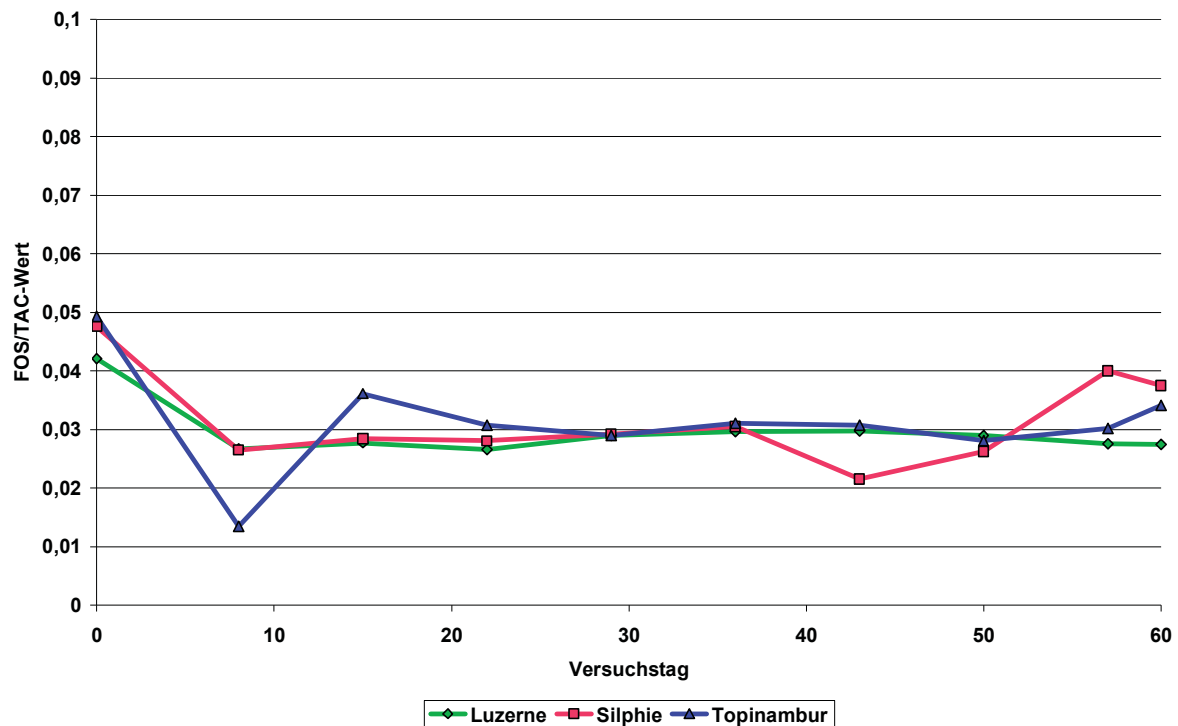


Abbildung 13: FOS/TAC-Wert des Gärrückstandes im Verlauf des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

Beide Abbildungen zeigen einen gleichmäßigen Verlauf des Prozesses. Der pH-Wert stabilisiert sich nach etwa 30 Tagen um 7,4 für alle drei Fermentationsprozesse. Der bisher nur selten diskutierte FOS/TAC-Wert, welcher die Basen-(Carbonat-)Reserve des Prozesses anzeigt und unter 0,3 liegen sollte, bewegt sich in einem wesentlich niedrigeren Bereich, so dass die Gefahr einer Übersäuerung der Prozesse zu keinem Zeitpunkt gegeben war.

Ein sehr interessanter Aspekt ist ausgehend von Abbildung 14 zu diskutieren. Offensichtlich reichert sich im Verlauf des Fermentationsprozesses organische Substanz an, da ein immer höherer Anteil an organischer Trockensubstanz im Gärrückstand festgestellt wird. Da die Biogasausbeute parallel dazu kaum zunimmt, ist zu vermuten, dass die Verweilzeit nicht lang genug ist, um die abbaufähige Biomasse zu verwerten. Ob mit einem anderen Rührregime eine Verbesserung eintritt oder ob auch nach 60 Tagen der Gleichgewichtszustand der Fermenter noch nicht erreicht ist, kann an dieser Stelle nicht gesagt werden.

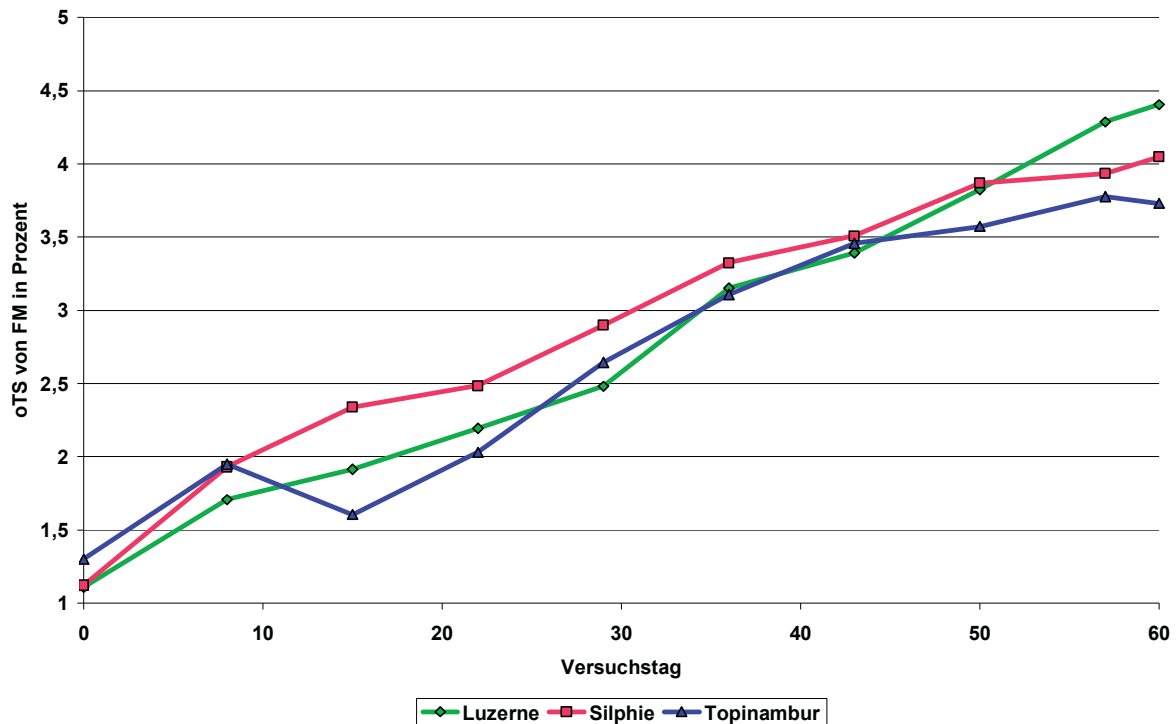


Abbildung 14: oTS-Gehalt des Gärrückstandes im Verlauf des kontinuierlichen anaeroben Abbaus von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur

Fazit

Die Ergebnisse der Versuche zum kontinuierlichen anaeroben Abbau von Rindergülle und den Kosubstraten Luzerne, Durchwachsene Silphie und Topinambur zeigen die prinzipielle Möglichkeit, die genannten Substrate in Biogasanlagen als Kosubstrate einzusetzen.

Die besten Ausbeuten mit dem höchsten Methangehalt wurden bei dem Versuch mit Luzerne gemessen. Allerdings liegen die Unterschiede zwischen den drei Kosubstraten noch nahe der Fehlergrenze der eingesetzten Messmethoden. Eine höhere Datendichte ist hier anzustreben. Offensichtlich ist in allen drei Versuchen auch nach 60 Tagen Versuchsdauer noch kein stabiler Zustand erreicht, was sich durch einen langsamen aber stetigen Anstieg des oTS-Gehaltes des Gärrückstandes bemerkbar macht.

Ob die vorgegebene Verweilzeit ausreichend ist, um zu einem effizienten Abbau der Produkte zu gelangen, kann an Hand der Versuchsergebnisse nicht endgültig geklärt werden.

3.1.2 Versuchsstandort Heßberg

An Standort Heßberg, der eine niedrigere Jahresdurchschnittstemperatur als Dornburg aufweist, wurden, neben den zwei Maissorten Sudangras und Topinambur in mehrjähriger Nutzung sowie Durchwachsene Silphie geprüft. Von einem Anbau verschiedener Zuckerhirsesorten ist wegen deren höheren Temperaturanforderungen abgesehen worden. Statt Luzernegrass kam an diesem feuchteren Standort Klee gras zum Anbau.

Aufgrund der standortbedingten Witterungsbedingungen waren bei allen Pflanzenarten, außer bei Topinambur, nur zwei Probeernten möglich.

Generell lagen die Erträge des Jahres 2004 in Heßberg auf deutlich niedrigerem Niveau als in Dornburg. Auffällig waren auch die niedrigen TS-Gehalte, die lediglich beim Silomais und beim Topinambur der dritten Probeernte eine sichere Silierung zugelassen hätten (Tab. 24).

Bei beiden Maissorten stieg die Methanausbeute bei der 2. Probeernte an, wobei sich die Sorten nicht wesentlich unterschieden.

Sudangras als auch Topinambur reichten sowohl in ertraglicher Hinsicht als auch in Bezug auf die Methangehalte nicht an den Mais heran. Beide Pflanzenarten realisierten damit deutlich niedrigere theoretische Methanerträge je Flächeneinheit.

Beim Klee gras sind sehr gute Ergebnisse nach dem Schröpfschnitt in der 1. Probeernte zu erkennen. In der 2. Probeernte sanken diese wieder deutlich ab.

Tabelle 24: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Heßberg 2004

| Substrat | Erntetermin 2004 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m ³ /ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Mais PR38F53 | 11.10. | 20,3 | 569,1 | 295,9 | 117,0 | 3462 |
| Mais PR38F53 | 04.11. | 25,0 | 589,3 | 306,4 | 111,0 | 3401 |
| Mais Doge | 11.10. | 16,0 | 567,0 | 294,8 | 112,0 | 3302 |
| Mais Doge | 04.11. | 19,4 | 579,0 | 301,1 | 99,0 | 2981 |
| Sudangras Susu | 11.10. | 18,6 | 531,9 | 281,9 | 80,0 | 2255 |
| Sudangras Susu | 25.10. | 19,7 | 493,4 | 261,5 | 82,0 | 2144 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 20.09. | 22,6 | 548,3 | 285,1 | 105,0 | 2994 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 04.10. | 22,3 | 549,2 | 285,6 | 79,0 | 2228 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 25.10. | 27,6 | 532,4 | 276,8 | 68,0 | 1882 |
| Klee gras Schröpfschnitt | 09.08. | 19,9 | 570,4 | 308,0 | 78,0 | 2402 |
| Klee gras | 10.09. | 27,8 | 566,7 | 306,0 | 85,0 | 2601 |
| Klee gras | 13.10. | 21,9 | 574,9 | 298,9 | 26,0 | 777 |

Im zweiten Versuchsjahr lagen die Erträge aller Pflanzenarten generell auf deutlich höherem Niveau, was den Einfluss der Jahreswitterung deutlich widerspiegelt.

Die beiden Maissorten verhielten sich bezüglich ihrer Erträge wieder proportional der errechneten Methangasausbeute. Der Mais „PR38F53“ war dem Mais „Doge“ in beiden Parametern überlegen (Tab. 25).

Das Sudangras erreichte 2005 ähnlich hohe Erträge wie der Silomais und höhere als der Energiemais „Doge“. Die Methanausbeute bei Sudangras war zum Zeitpunkt der 1. Probeernte am höchsten und verlief ebenfalls parallel zum Ertrag.

Im Gegensatz zur VS Dornburg zeigte der Topinambur in der VS Heßberg im 2. Anbaujahr außerordentlich gute Ergebnisse. Er war im Ertrag der Vergleichsfruchtart Mais bei allen Ernteterminen überlegen und übertraf auch im Methanertrag alle anderen Pflanzenarten. Die Methanausbeute verlief proportional zum Ertrag.

Die Durchwachsene Silphie, die 2005 erstmalig beerntet werden konnte, wies ähnlich gute Ergebnisse auf wie am Standort Dornburg und lag im Ertragsniveau teilweise über dem Mais. Obwohl sich die Methanausbeute während der Ernteperiode kaum änderte, war der erste Erntetermin durch den höheren Biomasseertrag hinsichtlich der Methanerträge je Flächeneinheit am besten.

Die kumulierten Werte der drei Probeernten bei Klee gras weisen darauf hin, dass in dieser Region (Vorgebirgslage) eine Ernte zur Nutzung als Kofermentpflanze zu Blühbeginn erfolgen sollte. Die zweite Versuchsbeerntung zu Blühende vom 01. September war auf Grund des TS-Verlaufes nicht mehr verwertbar.

Tabelle 25: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Heßberg 2005

| Substrat | Erntetermin 2005 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 06.10. | 26,5 | 546,3 | 297,4 | 168,9 | 5023 |
| Mais PR38F53 | 17.10. | 30,1 | 577,3 | 313,2 | 153,7 | 4814 |
| Mais Doge | 06.10. | 18,9 | 540,6 | 293,6 | 133,6 | 3922 |
| Mais Doge | 17.10. | 17,7 | 559,6 | 302,4 | 134,4 | 4064 |
| Sudangras Susu | 26.09. | 21,8 | 498,4 | 268,8 | 174,3 | 4685 |
| Sudangras Susu | 11.10. | 24,1 | 461,9 | 248,4 | 159,7 | 3967 |
| Sudangras Susu | 17.10. | 28,3 | 414,2 | 223,6 | 157,7 | 3526 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 15.09. | 31,1 | 537,6 | 288,8 | 232,8 | 6723 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 26.09. | 31,0 | 518,5 | 277,1 | 187,8 | 5204 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 11.10. | 33,5 | 496,4 | 265,2 | 270,5 | 7174 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 15.09. | 22,9 | 600,7 | 332,8 | 184,3 | 6134 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 28.09. | 25,0 | 601,6 | 330,0 | 139,2 | 4594 |
| Durchw. Silphie, 2. J. | 11.10. | 31,5 | 603,2 | 332,3 | 176,0 | 5845 |
| Kleegrass Blühbeginn | 02.06 | 16,2 | | | 64,2 | |
| | 26.07. | 25,6 | | | 67,2 | |
| | 13.10. | 24,6 | | | 27,0 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 563,4 | 316,3 | 158,4 | 5010 |
| Kleegrass Vollblüte | 02.06. | 15,7 | | | 62,2 | |
| | 10.08. | 28,3 | | | 58,4 | |
| | 13.10. | 24,1 | | | 14,3 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 508,8 | 287,5 | 134,9 | 3878 |
| Kleegrass Blühende | 02.06. | 14,9 | | | 57,0 | |
| | 01.09. | 43,6 | | | 52,1 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | Wildschaden | | 109,1 | |

Die Ernte- und Methanerträge des dritten Versuchsjahres (Tab. 26) zeigen die gleiche Tendenz auf wie im Vorjahr. Bei den beiden Maissorten sind diese sogar fast identisch. Der Energiemais „Doge“ erreichte auch 2006 nicht die Erträge des Silomais „PR38F53“ und kam trotz des langen warmen Herbstes nicht annähernd an den für eine Silierung erforderlichen TS-Gehalt heran.

Sudangras erreichte zum 3. Erntetermin eine deutliche Ertragssteigerung und übertraf zu diesem Termin den Silomais, allerdings könnte auch bei dieser Kultur der niedrige TS-Gehalt bei der Silierung Probleme verursachen.

Der im 3. Versuchsjahr stehende Topinambur war entgegen aller Theorien und anders als in Dornburg mit teilweise mehr als 200 dt TM/ha noch genauso massewüchsig wie im 2. Jahr. In Heßberg bildeten die Pflanzen auch nicht so viele Stängel aus. Die Stängel waren demzufolge stärker und weniger verholzt. Trotz geringerer Methangehalte übertraf er rein rechnerisch den Mais auch im Methanertrag deutlich.

Noch höhere Biomasse- und Methanerträge realisierte die Durchwachsene Silphie im 2. Ertragsjahr. Der Trockenmasseertrag zur 1. Probeernte von 292 dt TM/ha ist das beste Ergebnis aller geprüften Pflanzenarten an allen Standorten. Aufgrund ähnlich hoher Methangehalte übertraf sie den Silomais hinsichtlich der Methanerträge um etwa 30 %.

Das Klee gras fiel im dritten Standjahr gegenüber 2006 ab. Der Bestand war sehr inhomogen, die Gräser im Gemisch fast vollständig verschwunden.

Tabelle 26: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Heßberg 2006

| Substrat | Erntetermin 2006 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 28.09. | 25,2 | 684,5 | 369,1 | 168,87 | 6234 |
| Mais PR38F53 | 11.10. | 27,1 | 578,7 | 312,2 | 153,73 | 4799 |
| Mais Doge | 28.09. | 20,5 | 538,4 | 291,0 | 133,58 | 3888 |
| Mais Doge | 11.10. | 18,2 | 651,2 | 364,3 | 134,43 | 4896 |
| Sudangras Susu | 18.09. | 23,3 | 509,3 | 274,7 | 180,7 | 4964 |
| Sudangras Susu | 26.09. | 22,4 | 471,7 | 253,9 | 160,9 | 4085 |
| Sudangras Susu | 11.10. | 22,6 | 448,9 | 241,7 | 201,6 | 4873 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 07.09. | 28,3 | 518,4 | 277,9 | 226,1 | 6283 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 18.09. | 33,7 | 517,3 | 276,1 | 199,6 | 5511 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 27.09. | 31,7 | 503,3 | 268,7 | 256,6 | 6895 |
| Durchw. Silphie | 07.09. | 23,6 | 590,3 | 320,4 | 292,2 | 9362 |
| Durchw. Silphie | 18.09. | 27,2 | 598,9 | 323,0 | 234,7 | 7581 |
| Durchw. Silphie | 27.09. | 27,4 | 599,9 | 324,7 | 274,8 | 8923 |
| Klee gras Blühbeginn | 23.06. | 28,6 | | | 79,5 | |
| | 03.08. | 23,1 | | | 28,2 | |
| | 09.10. | 25,8 | | | 20,1 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | 25,8 | 486,5 | 272,5 | 127,8 | 3483 |
| Klee gras Vollblüte | 29.06. | 23,4 | | | 75,2 | |
| | 31.08. | 23,8 | | | 37,1 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 518,5 | 289,7 | 112,3 | 3253 |
| Klee gras Blühende | 29.06. | 22,1 | | | 71,7 | |
| | 14.09. | 29,2 | | | 38,0 | |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 510,9 | 283,4 | 109,7 | 3109 |

In Betrachtung aller drei Versuchsjahre wird deutlich, dass Durchwachsene Silphie, Topinamburkraut und in günstigen Jahren auch das Sudangras am Standort Heßberg mit Silomais konkurrieren können. Auch Klee gras kommt hier durchaus als Kofermentpflanze in Betracht. Wegen der späten Reife und der damit verbundenen niedrigen TS-Gehalte eignet sich der Energiemais „Doge“ nicht für einen Anbau in der Vorgebirgslage (Abb. 15).

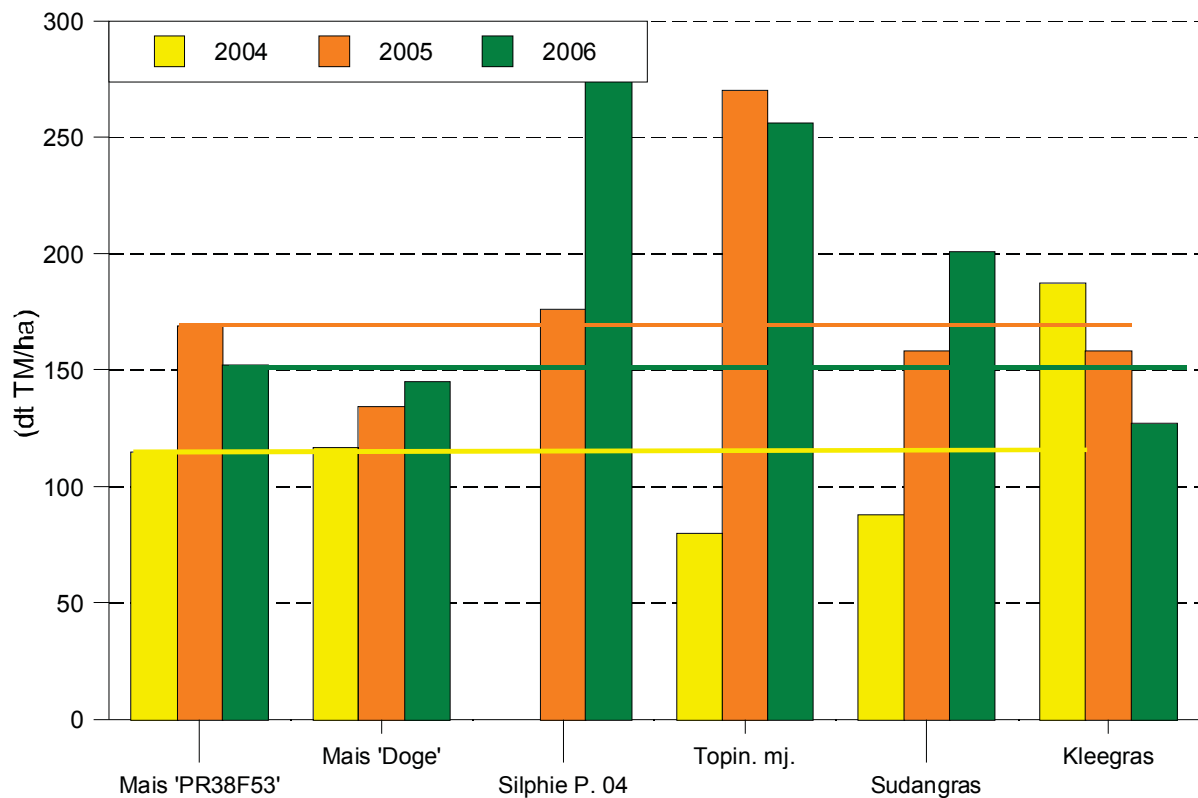


Abbildung 15: Biomasseerträge von Energiepflanzen – Optimum aus 3 Probeernten, VS Heßberg 2004 bis 2006

3.1.3 Versuchsstandort Müllheim

Der Standort Müllheim in der Rheinebene ist durch hohe Temperaturen und hohe Jahresniederschläge bei günstiger Niederschlagsverteilung gekennzeichnet. Er bietet somit optimale Voraussetzungen für ein gutes Pflanzenwachstum und müsste für wärme- und feuchtigkeitsliebende Fruchtarten prädestiniert sein. Deshalb wurden hier, neben den Maissorten, Zuckerhirse, Sudangras, Topinambur und Klee gras geprüft. Die ebenfalls für den Standort vorgesehene Durchwachsene Silphie wuchs nicht an und wurde ab 2006 durch eine zweite Zuckerhirsesorte ersetzt.

Im ersten Versuchsjahr 2004 liefen alle Pflanzenarten gleichmäßig auf und entwickelten sich optimal. Leider wurden durch einen Hagelschlag am 08. Juli alle Pflanzen stark geschädigt, so dass die Erträge insgesamt nicht den Erwartungen entsprachen.

Die Maispflanzen des Energiemaisses „Doge“ erholten sich nicht mehr. Aus diesem Grund wurden nur zwei Probeschnitte durchgeführt. Am Besten überstanden das Sudangras und die Zuckerhirse den Hagelschaden. Dies weist auf ein besseres Regenerationsvermögen der Hirsearten hin, was in Hinblick auf die Klimaänderung und die zu erwartende Zunahme von Starkniederschlagsereignissen von Bedeutung sein könnte.

Die Pflanzen regenerierten sich gut und lieferten noch einen guten Ertrag. Die Haupttriebe des Topinamburs wurden vollständig zerstört. Die Pflanzen schoben später Seitentriebe, allerdings mit sehr geringem Wuchs und verhältnismäßig wenig Blattmasse. Beim Klee gras waren durch die starke Lagerbildung des Bestandes Folgeschnitte nicht mehr möglich.

Auf Grund des Unwetterschadens sind die ermittelten Ergebnisse als nicht repräsentativ anzusehen. Die errechneten theoretischen Biogas- und Methanausbeuten und die ermittelten Ernteerträge sind dennoch tabellarisch (Tab. 27) aufgelistet. Hervorzuheben sind allerdings die Widerstandsfähigkeit und die sehr gute Massewüchsigkeit von Sudangras und dem Silomais „PR38F53“ nach dem Unwetterschaden.

Tabelle 27: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Müllheim 2004

| Substrat | Erntetermin 2004 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 12.08. | 20,6 | 570,0 | 296,4 | 94,0 | 2786 |
| Mais PR38F53 | 08.09. | 28,9 | 588,0 | 305,8 | 164,0 | 5015 |
| Mais Doge | 12.08. | 20,6 | 572,0 | 297,4 | 94,0 | 2796 |
| Mais Doge | 08.09. | 28,9 | 573,0 | 298,0 | 102,0 | 3040 |
| Sudangras Susu | 12.08. | 15,7 | 531,0 | 276,1 | 64,0 | 1767 |
| Sudangras Susu | 08.09. | 21,7 | 499,0 | 254,5 | 225,0 | 5726 |
| Sudangras Susu | 21.10. | 30,5 | 479,0 | 244,3 | 126,0 | 3078 |
| Sudangras Susu | 08.11. | 28,0 | 478,0 | 243,8 | 158,0 | 3852 |
| Zuckerhirse Friggo | 12.08. | 15,4 | 533,0 | 277,2 | 72,0 | 1996 |
| Zuckerhirse Friggo | 08.09. | 20,9 | 475,0 | 251,8 | 133,0 | 3349 |
| Zuckerhirse Friggo | 12.08. | 26,8 | 474,0 | 246,5 | 81,0 | 1997 |
| Zuckerhirse Friggo | 08.11. | 25,1 | 566,0 | 294,3 | 68,0 | 2001 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 21.08. | 30,4 | 558,0 | 284,6 | 22,0 | 626 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 08.11. | 28,9 | 532,0 | 271,3 | 12,0 | 326 |
| Kleegrass Schröpfschnitt | 12.08. | 19,2 | 572,0 | 303,2 | 27,0 | 822 |
| Kleegrass | 08.09. | 20,0 | 570,0 | 302,1 | 49,0 | 1480 |
| Kleegrass | 21.10. | 32,6 | 571,0 | 302,6 | 25,0 | 756 |
| Kleegrass | 08.11. | 25,0 | 569,0 | 301,6 | 26,0 | 784 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 570,5 | 302,4 | 127,0 | 3840 |

Im zweiten Versuchsjahr 2005 bestätigte sich Müllheim als hervorragender Maisstandort. Nicht nur der Mais „Doge“ wies überragende Methanerträge auf, auch der Mais „PR38F53“ übertraf alle anderen geprüften Pflanzenarten (Tab. 28).

Beim Sudangras verlief der Ertragszuwachs nur zögerlich. Proportional dazu verlief auch die Methanausbeute, die allerdings nicht befriedigen konnte.

Die Zuckerhirse „Friggo“ zeigte, wie an allen Standorten, keine verwertbaren Ernte- und Methanerträge und wird deshalb im Jahr 2006 in den Prüfungen durch die ertragsstärkeren Sorten „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ ersetzt.

Nicht nachvollziehbar ist das langsame Wachstum des Topinamburs, das nur eine Probeernte ermöglichte. Dies spiegelt sich auch im Methanertrag wider.

Kleegrass hatte durch den Hagelschlag im Jahr 2004 so stark gelitten, so dass auch im Berichtsjahr 2005 keine adäquaten Erträge erreicht worden sind.

Tabelle 28: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Müllheim 2005

| Substrat | Erntetermin 2005 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 13.10. | 38,9 | 574,5 | 306,9 | 196,6 | 6034 |
| Mais PR38F53 | 24.10. | 49,6 | 561,5 | 300,3 | 195 | 5856 |
| Mais Doge | 13.10. | 27,8 | 590,5 | 317,4 | 251,5 | 7983 |
| Mais Doge | 24.10. | 36,7 | 576,9 | 310,1 | 266,5 | 8264 |
| Sudangras Susu | 11.08. | 20,3 | 511,6 | 274,0 | 107,9 | 2956 |
| Sudangras Susu | 25.08. | 23,1 | 473,3 | 252,7 | 123,4 | 3118 |
| Sudangras Susu | 27.09. | 27,0 | 452,5 | 241,7 | 154,0 | 3722 |
| Zuckerhirse Friggo | 11.08. | 24,8 | 512,0 | 276,1 | 79,8 | 2203 |
| Zuckerhirse Friggo | 25.08. | 25,3 | 472,2 | 253,5 | 69,1 | 1752 |
| Zuckerhirse Friggo | 27.09. | 23,8 | 451,6 | 241,3 | 79,5 | 1918 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 16.11. | 52,4 | 520,9 | 278,2 | 76,2 | 2120 |
| Kleegras | 21.06. | 35,5 | 557,9 | 300,1 | 55,4 | 1663 |
| Kleegras | 30.06. | 23,1 | 484,0 | 261,5 | 52,2 | 1365 |
| Kleegras 1. Folgeschnitt | 20.08. | 27,4 | 565,0 | 307,5 | 22,7 | 698 |
| Kleegras 2. Folgeschnitt | 27.09. | 31,4 | 543,6 | 292,7 | 22,0 | 644 |

Im Versuchsjahr 2006 wiesen am Standort Müllheim nicht nur die beiden Maissorten mit um die 200 dt TM/ha sehr gute Erträge auf, sondern auch erstmalig das Sudangras und die Zuckerhirschen „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“, die ebenfalls Erträge um 180 dt TM/ha realisierten. Während das Sudangras zum 1. Schnitttermin seinen höchsten Ertrag hatte, blieb der Ertrag der Zuckerhirschen über alle drei Erntetermine annähernd gleich. Auch der TS-Gehalt änderte sich nur wenig und war eigentlich auch zum letzten Erntetermin für eine sichere Silierung noch etwas zu gering.

Der im 3. Jahr stehende Topinambur hatte ebenso schlechte Erträge wie in den Vorjahren. Auch die Knollenerträge würden eine Beerntung zum Einsatz als Koferment nicht rechtfertigen.

Kleegras verhielt sich in seiner Ertragsentwicklung ähnlich wie am Versuchsstandort Heßberg, auch hier war ein Rückgang des Grasanteils festzustellen. Die Gesamterträge erreichten nur etwa 40 % der Maiserträge und stellen somit die Eignung als Koferment in dieser Region in Frage. Die Ergebnisse des letzten Versuchsjahres 2006 beinhaltet Tabelle 29.

Tabelle 29: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Müllheim 2006

| Substrat | Erntetermin 2006 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|------------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 14.09. | 36,2 | 544,0 | 296,0 | 212,0 | 6275 |
| Mais PR38F53 | 27.09. | 38,5 | 584,0 | 317,0 | 205,0 | 6499 |
| Mais PR38F53 | 19.10. | 48,4 | 566,0 | 307,0 | 207,0 | 6355 |
| Mais Doge | 14.09. | 27,3 | 571,7 | 311,7 | 190,0 | 5909 |
| Mais Doge | 27.09. | 29,8 | 582,0 | 316,5 | 223,0 | 7058 |
| Mais Doge | 19.10. | 35,7 | 567,0 | 308,2 | 196,7 | 6063 |
| Sudangras Susu | 14.09. | 28,0 | 536,0 | 290,0 | 179,0 | 5191 |
| Sudangras Susu | 17.10. | 26,2 | 576,0 | 276,0 | 142,0 | 3919 |
| Sudangras Susu | 30.10. | 25,5 | 451,0 | 243,0 | 112,0 | 2721 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 14.09. | 25,5 | 534,0 | 289,0 | 178,0 | 5144 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 17.10. | 24,2 | 510,0 | 275,0 | 161,0 | 4428 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 30.10. | 24,7 | 550,0 | 242,0 | 185,0 | 4477 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 14.09. | 24,8 | 538,0 | 291,0 | 186,0 | 5413 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 17.10. | 24,9 | 513,0 | 277,0 | 187,0 | 5180 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 30.10. | 24,2 | 450,0 | 243,0 | 180,0 | 4374 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 14.09. | 35,6 | 528,0 | 285,0 | 83,0 | 2366 |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 27.09. | 31,3 | Probe verworfen | | 65,0 | - |
| Topinambur mehrjährig Kraut | 17.10. | 33,6 | 494,0 | 266,0 | 73,0 | 1942 |
| Topinambur mehrjährig Knolle | 14.09. | 18,4 | 642,0 | 347,0 | 32,0 | 1110 |
| Topinambur mehrjährig Knolle | 27.09. | 18,3 | 651,0 | 349,0 | 30,0 | 1047 |
| Topinambur mehrjährig Knolle | 17.10. | 18,0 | 652,0 | 250,0 | 25,0 | 625 |
| Kleegras Blühbeginn | 08.06. | 27,8 | 534,0 | 290,0 | 62,0 | 1798 |
| | 17.10. | 24,7 | 535,0 | 297,0 | 17,0 | 505 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | 26,3 | 534,5 | 293,5 | 79,0 | 2303 |
| Kleegras Vollblüte | 14.06. | 31,6 | 520,0 | 284,0 | 70,0 | 1988 |
| | 17.10. | 22,8 | 520,0 | 286,0 | 13,0 | 372 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | 27,2 | 520,0 | 285,0 | 83,0 | 2360 |
| Kleegras Blühende | 30.06. | 34,5 | 516,0 | 277,0 | 59,0 | 1634 |
| | 17.10. | 20,4 | 511,0 | 282,0 | 10,0 | 282 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | 27,5 | 513,5 | 279,5 | 69,0 | 1916 |

Insgesamt bestätigte sich der Standort Müllheim in der Rheinebene als sehr guter Maisstandort. Durch die lange Vegetationszeit erreichte der Energiemais „Doge“ sogar die Körnerreife. Pflanzenarten wie Sudangras oder die Zuckerhirsen „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ wiesen neben dem Mais auch sehr gute Erträge auf, allerdings waren hier sehr starke Jahresunterschiede zu verzeichnen, die vor einer abschließenden Wertung bezüglich der Eignung als Koferment näher beleuchtet werden müssten.

Kleegras und Topinambur scheinen für diesen Standort nicht geeignet (Abb. 16).

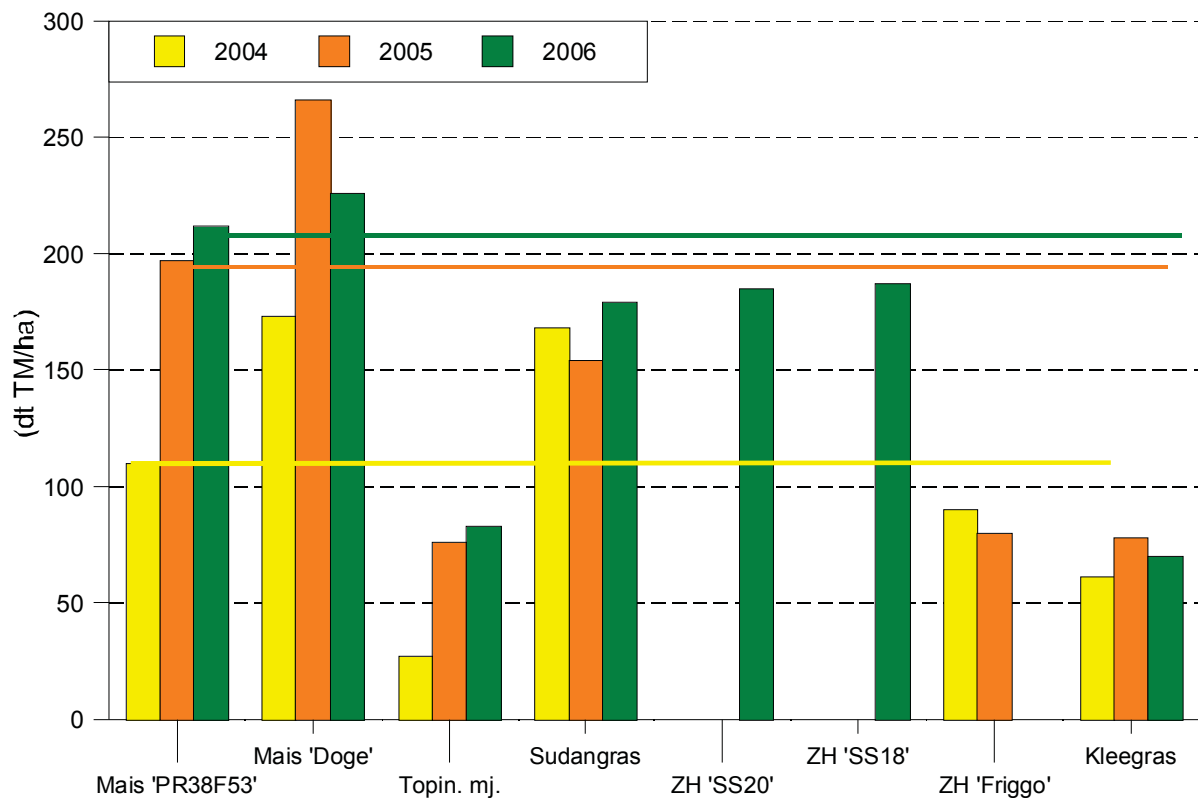


Abbildung 16: Biomasseerträge von Energiepflanzen – Optimum aus 3 Probeernten, VS Müllheim 2004 bis 2006

3.1.4 Versuchsstandort Burkersdorf

Der Standort Burkersdorf in Vorgebirgslage, gekennzeichnet durch niedrige Jahresdurchschnittstemperaturen, geringe Niederschläge und flachgründigen Boden, ist als Extremstandort im Jahr 2005 neu ins Versuchsprogramm aufgenommen worden.

Erwartungsgemäß lagen die Erträge aller Pflanzenarten, außer dem Mais „Doge“, am Standort Burkersdorf im Jahr 2005 unter dem Niveau der anderen drei Standorte. Allerdings erreichte der Energiemais hier die Siloreife nicht.

Bei fast allen Pflanzenarten unterschieden sich die Methangehalte zu den einzelnen Ernteterminen relativ wenig, so dass der Methanertrag pro Hektar nahezu proportional dem Biomasseertrag verlief. In der Regel wurden die höchsten Biomasse- und Methanerträge in Burkersdorf bei der 3. Probeernte erreicht (Tab. 30). Dies trifft auch auf die Addition der Kraut- und Knollenerträge des einjährig angebauten Topinamburs zu, wobei die eingangs erwähnten Probleme bei der Verwendung der Knollen in der Biogasanlage zu beachten sind. Eine Krautnutzung allein wäre in 2005 in Burkersdorf aufgrund der niedrigen Erträge nicht sinnvoll gewesen.

Das im Frühjahr 2005 angesäte Luzernegrass lief aufgrund der ausgeprägten Vorsommertrockenheit, verbunden mit extrem niedrigen Temperaturen in dieser Zeitspanne, sehr schlecht und zögerlich auf, so dass keine Ertragsermittlung möglich war. Nach einem Schröpfungsschnitt wurde vom Wiederaufwuchs lediglich eine Probe zur Inhaltsstoffuntersuchung entnommen. Die ertragsschwache Zuckerhirse „Friggo“ wurde im zweiten Versuchsjahr durch die Sorten „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ ersetzt.

Tabelle 30: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Burkersdorf 2005

| Substrat | Erntetermin 2005 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (m³/ha) |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Mais PR38F53 | 09.09. | 18,8 | 538,0 | 293,5 | 80,1 | 2351 |
| Mais PR38F53 | 04.10. | 21,8 | 566,4 | 306,6 | 104, | 3188 |
| Mais PR38F53 | 18.10. | 28,2 | 557,2 | 302,5 | 127,6 | 3860 |
| Mais Doge | 09.09. | 17,6 | 506,0 | 276,3 | 96,3 | 2661 |
| Mais Doge | 04.10. | 16,0 | 570,7 | 307,4 | 118,6 | 3646 |
| Mais Doge | 18.10. | 21,2 | 547,3 | 296,8 | 165,5 | 4912 |
| Sudangras Susu | 08.09. | 21,6 | 503,7 | 275,2 | 46,7 | 1285 |
| Sudangras Susu | 04.10. | 25,6 | 469,6 | 254,0 | 77,0 | 1955 |
| Sudangras Susu | 18.10. | 29,5 | 441,0 | 238,5 | 96,4 | 2299 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 08.09. | 19,1 | 503,1 | 276,3 | 50,1 | 1384 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 04.10. | 20,8 | 468,4 | 254,5 | 84,8 | 2158 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 18.10. | 25,5 | 444,1 | 240,5 | 105,5 | 2537 |
| Zuckerhirse Friggo | 08.09. | 25,7 | 497,5 | 273,2 | 39,4 | 1076 |
| Zuckerhirse Friggo | 04.10. | 23,8 | 466,6 | 255,7 | 47,5 | 1215 |
| Zuckerhirse Friggo | 18.10. | 27,4 | 443,0 | 241,9 | 66,9 | 1618 |
| Topinambur einjährig Kraut | 09.09. | 27,6 | 518,9 | 286,6 | 86,0 | 2465 |
| Topinambur einjährig Kraut | 04.10. | 28,3 | 528,0 | 289,2 | 97,6 | 2823 |
| Topinambur einjährig Kraut | 18.10. | 31,3 | 518,7 | 281,4 | 83,4 | 2347 |
| Topinambur einjährig Knolle | 19.10. | 21,2 | 641,9 | 346,5 | 25,3 | 877 |
| Topinambur einjährig Knolle | 19.10. | 22,3 | 650,6 | 349,4 | 57,6 | 2012 |
| Topinambur einjährig Knolle | 19.10. | 25,1 | 649,1 | 348,7 | 76,6 | 2671 |
| Luzernegras Schröpschnitt | 10.08. | stark verunkrautet | | | | |
| Luzernegras 1. Schnitt | 18.10. | 27,8 | 510,6 | 295,9 | - | - |

Die Versuchsergebnisse in 2006 spiegeln die des Vorjahres fast wider (Tab. 31). Ausnahmen bilden Sudangras und die beiden Zuckerhirsen, die sich auf etwa dem Niveau des Energiemaisses „Doge“ bewegten.

Die Erträge sind aber, verglichen mit denen der anderen Versuchsstationen, generell gering, was den Standortgegebenheiten dieses Vorgebirgsstandortes geschuldet ist. Problematisch war wiederum bei den wärmeliebenden Sorghumhirsen und auch dem Energiemais der geringe TS-Gehalt selbst bei den letzten Probeernten (Tab. 31).

Das 2005 etablierte Luzernegras erreichte im 2. Standjahr deutlich bessere Erträge und reichte im Methanertrag nahezu an die Hirsearten heran.

Tabelle 31: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Abhängigkeit vom Erntetermin, VS Burkersdorf 2006

| Substrat | Erntetermin 2006 | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) |
|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Mais PR38F53 | 14.09. | 21,6 | 542,9 | 295,4 | 88,7 | 2620 |
| Mais PR38F53 | 09.10. | 31,1 | 578,0 | 313,1 | 115,3 | 3610 |
| Mais PR38F53 | 24.10. | 22,5 | 564,4 | 304,4 | 103,0 | 3135 |
| Mais Doge | 14.09. | 22,4 | 535,2 | 291,6 | 106,9 | 3117 |
| Mais Doge | 09.10. | 22,8 | 567,5 | 306,4 | 133,9 | 4103 |
| Mais Doge | 24.10. | 24,0 | 546,5 | 295,3 | 121,0 | 3573 |
| Sudangras Susu | 14.09. | 17,7 | 508,6 | 275,3 | 69,9 | 1924 |
| Sudangras Susu | 09.10. | 23,6 | 470,1 | 254,8 | 94,5 | 2408 |
| Sudangras Susu | 24.10. | 28,8 | 443,2 | 239,4 | 113,7 | 2722 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 14.09. | 19,0 | 505,8 | 274,9 | 95,7 | 3631 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 09.10. | 23,6 | 469,2 | 254,5 | 130,6 | 3324 |
| Zuckerhirse Super Sile 20 | 24.10. | 23,8 | 445,5 | 240,9 | 134,1 | 3230 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 14.09. | 21,4 | 504,6 | 275,1 | 103,3 | 2842 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 09.10. | 26,0 | 470,0 | 254,9 | 129,4 | 3298 |
| Zuckerhirse Super Sile 18 | 24.20. | 26,4 | 446,3 | 240,8 | 136,6 | 3289 |
| Topinambur einjährig Kraut | 14.09. | 34,8 | 521,8 | 284,4 | 109,7 | 3120 |
| Topinambur einjährig Kraut | 09.10. | 29,1 | 520,0 | 284,2 | 87,5 | 2487 |
| Topinambur einjährig Kraut | 24.10. | 35,7 | 500,5 | 271,2 | 77,5 | 2102 |
| Topinambur einjährig Knolle | 14.09. | 22,4 | 834,4 | 447,6 | 29,0 | 1298 |
| Topinambur einjährig Knolle | 09.10. | 22,4 | 808,7 | 431,6 | 65,1 | 2810 |
| Topinambur einjährig Knolle | 24.10. | 25,2 | 789,4 | 422,3 | 79,5 | 3357 |
| Luzernegras Blühbeginn | 07.06. | 20,9 | 510,9 | 285,1 | 55,7 | 1588 |
| | 10.07. | 26,3 | 507,3 | 288,0 | 25,8 | 743 |
| | 11.08. | 20,1 | 503,9 | 298,9 | 5,0 | 149 |
| | 25.10. | 23,8 | 508,7 | 294,8 | 7,4 | 218 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 507,7 | 291,7 | 93,9 | 2698 |
| Luzernegras Vollblüte | 07.06. | 20,6 | 487,3 | 273,1 | 55,6 | 1518 |
| | 17.07. | 31,4 | 486,2 | 275,3 | 31,9 | 878 |
| | 22.09. | 30,4 | 467,1 | 273,1 | 21,6 | 590 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 480,2 | 273,8 | 109,1 | 2986 |
| Luzernegras Blühende | 07.06. | 20,1 | 476,6 | 267,1 | 54,8 | 1464 |
| | 21.07. | 32,3 | 477,7 | 270,1 | 33,1 | 894 |
| | 09.10. | 29,2 | 472,9 | 276,0 | 22,1 | 610 |
| Kumuliert bzw. gemittelt | | | 475,7 | 271,1 | 110,0 | 2968 |

Bei den dargestellten Optimumerträgen über beide Versuchsjahre (Abb. 17) ist deutlich zu sehen, dass die beiden Maissorten im zweiten Versuchsjahr niedrigere Erträge aufwiesen. Die massewüchsigeren Sorten „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ konnten in ertraglicher Hinsicht mit dem Mais konkurrieren. Auch das Luzernegras im zweiten Standjahr reichte fast an die Maiserträge heran.

Generell könnten für den kalten, trockenen Standort Burkersdorf ausgewählte Hirsensorten und Luzernegras neben Mais als Kofermentpflanzen für die Biogasanlage in Betracht kommen.

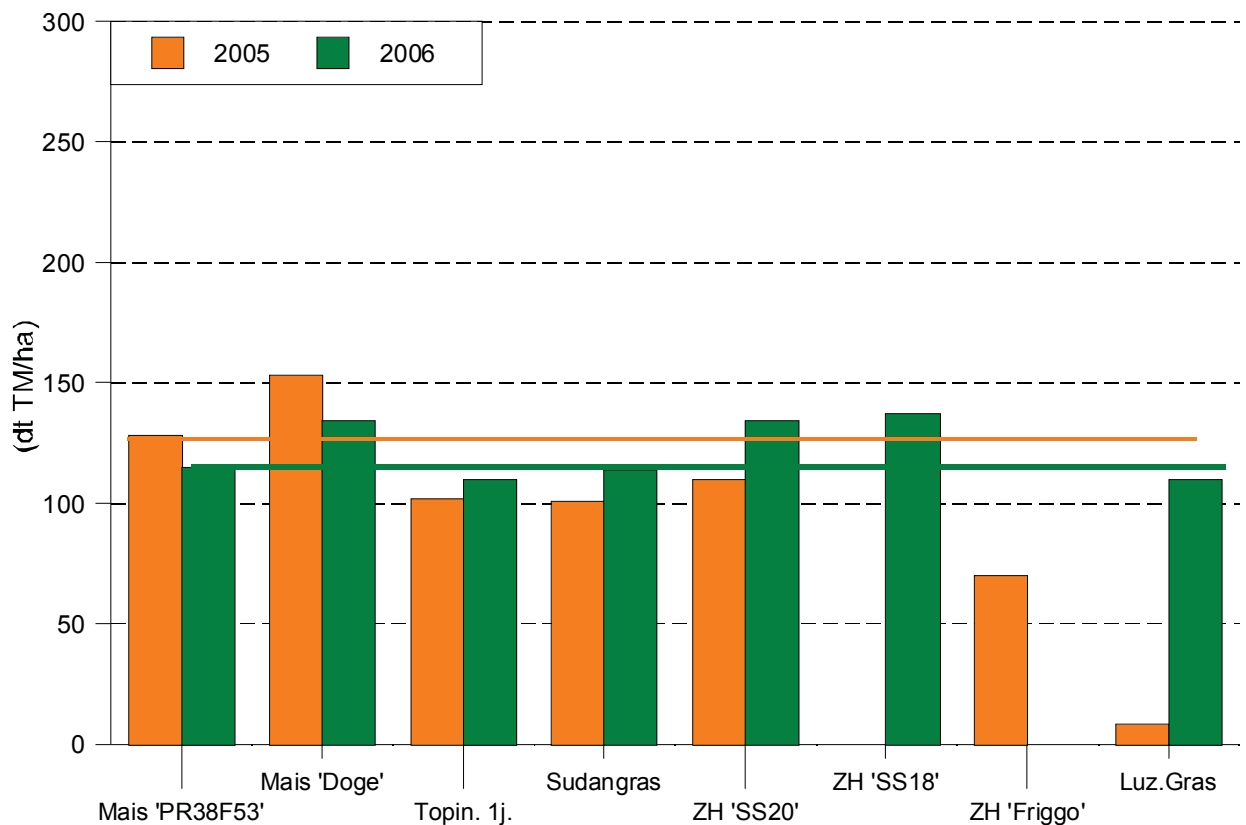


Abbildung 17: Biomasseerträge von Energiepflanzen – Optimum aus 3 Probeernten, VS Burkersdorf 2005 und 2006

3.1.5 Standorteignung der Energiepflanzen

Wie die o. g. Ergebnisse verdeutlichen, wird der Ertrag der einzelnen Pflanzenarten in starkem Maße von den Gegebenheiten des jeweiligen Standortes bestimmt. Da die Versuchsstandorte generell über ein sehr unterschiedliches Ertragspotenzial verfügen, beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen zur Anbaueignung der Kulturen auf die Relativerträge im Vergleich zum Silomais „PR38F53“, der als Standard dient.

Wie aus Abbildung 18 hervorgeht, erreichte der Energiemais „Doge“, außer in Heßberg, an allen Standorten in allen Jahren höhere Erträge als der Silomais, wobei, wie bereits bei den einzelnen Standorten erwähnt, der z. T. niedrige TS-Gehalt zur Ernte kritisch zu betrachten ist. Dagegen erwies sich Heßberg als „Topinamburstandort“. Lediglich hier übertraf diese Fruchtart den Standard in 2 Versuchsjahren. An allen anderen Standorten lag der Ertrag deutlich unter der Vergleichsart.

Die geringste Streubreite wiesen die Erträge am Standort Dornburg auf. Außer Topinambur in mehrjähriger Nutzung und Sudangras im Jahr 2006 lagen die Erträge der restlichen Pflanzen im Bereich des Silomaises.

Gleichzeitig verdeutlicht die Grafik aber auch den starken Einfluss der Jahreswitterung auf die Biomassebildung der einzelnen Kulturen. Während die massewüchsige Zuckerhirse „Super Sile 20“ in Dornburg in allen Jahren höhere Erträge als der Standard erzielte, konnte sie in Burkersdorf nur im Jahr 2006 den Silomais übertreffen.

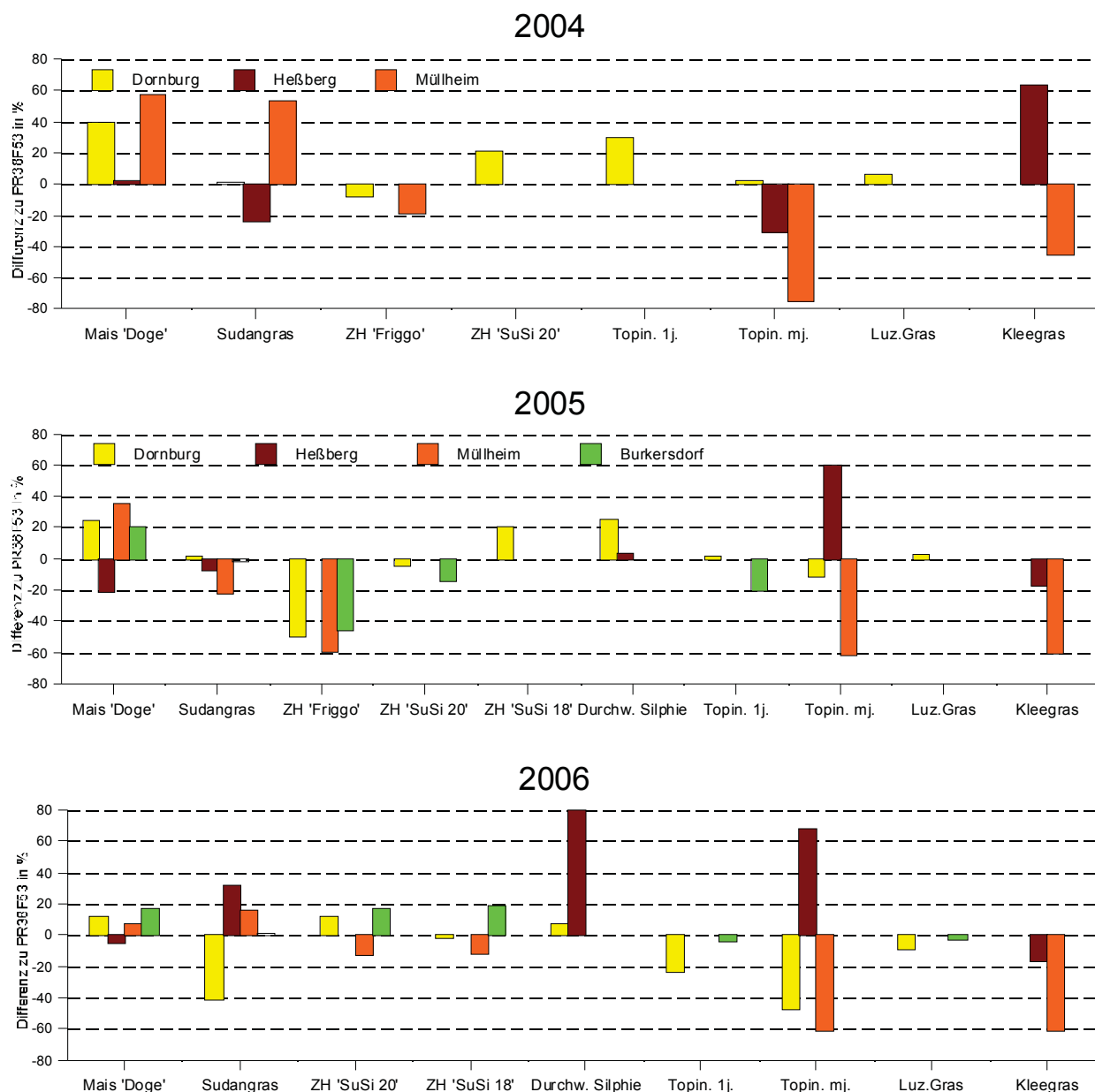
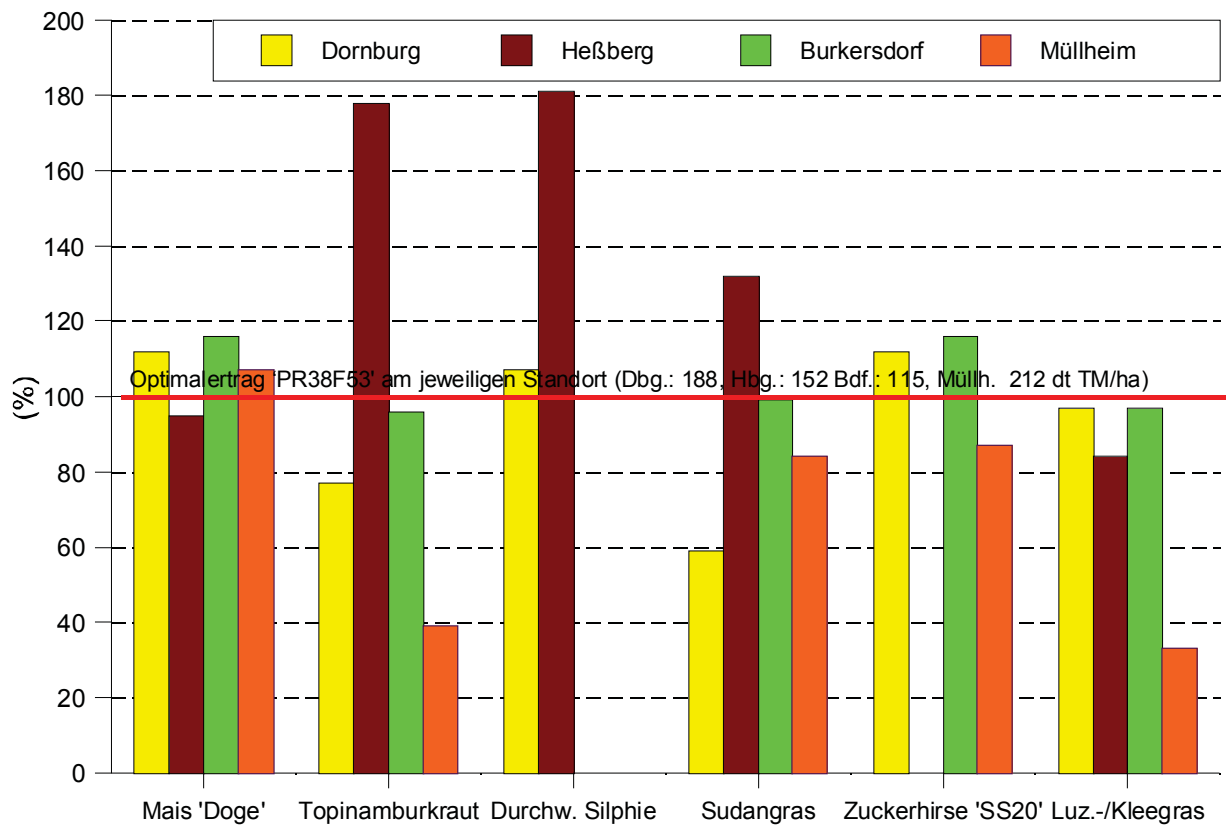
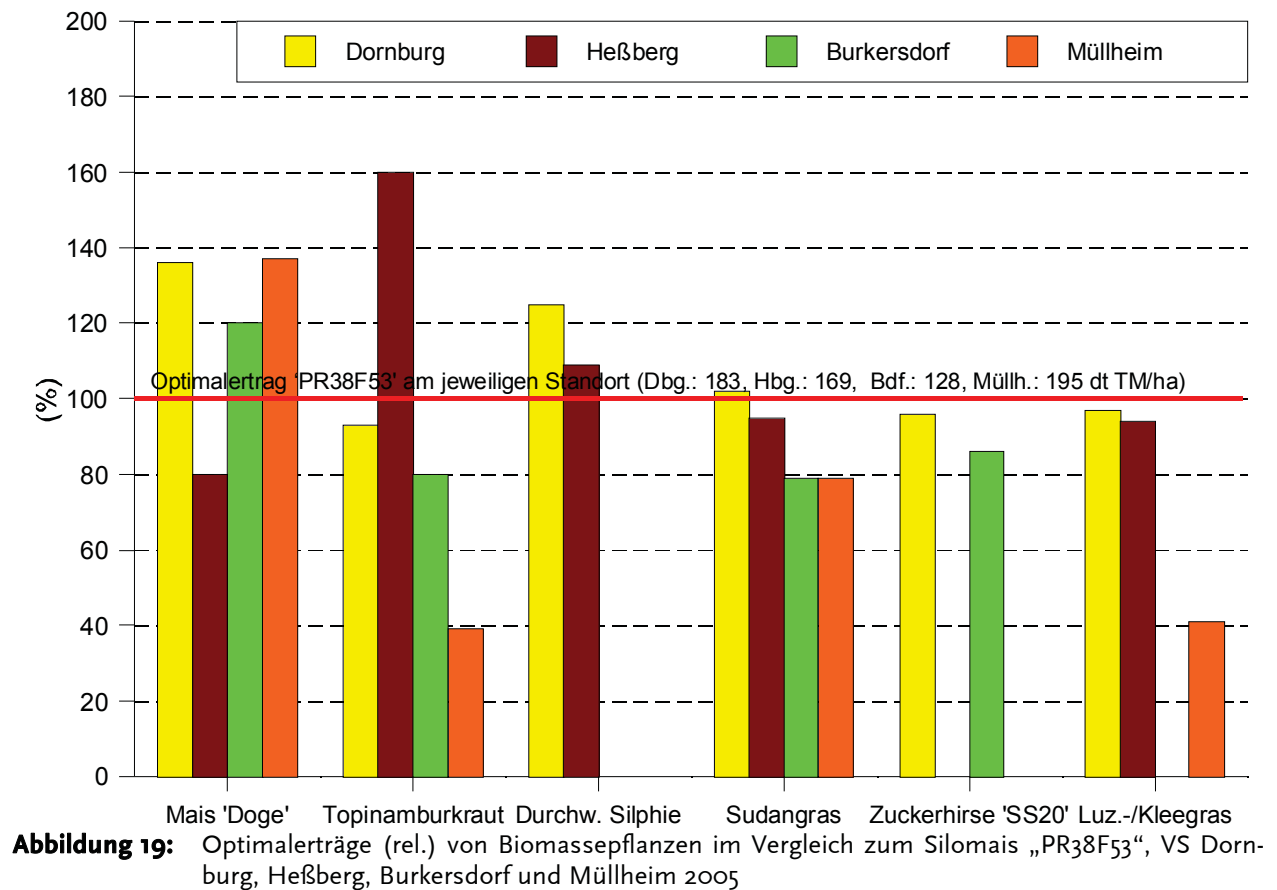


Abbildung 18: Differenzerträge (relativ) von Biomassepflanzen im Vergleich zum Silomais PR38F53, VS Dornburg, Heßberg, Müllheim und Burkersdorf 2004 bis 2006

Insgesamt ist einzuschätzen, dass die massewüchsigen Zuckerhirsesorten, wie z. B. „Super Sile 20“, auch auf kühleren Vorgebirgsstandorten (Burkersdorf) mit Silomais konkurrieren können. Gerade im Bereich der Zuckerhirse laufen gegenwärtig große Anstrengungen seitens der Pflanzenzüchtung, das Spektrum anbauwürdiger Sorten zu erhöhen. Dabei werden zunehmend, ähnlich wie beim Mais, auch Sorten unterschiedlicher Reifezeit angeboten, mit denen der Landwirt auf standortspezifische Vegetationszeiten reagieren kann.

Auch Klee- und Luzerngras sind durchaus anbauwürdig. Problematisch ist hier jedoch die mehrschnittige Nutzung, die kostenseitig negativ zu Buche schlägt.

Überragende Ergebnisse auf den zwei Prüfstandorten Dornburg und Heßberg lieferte die Durchwachsene Silphie, die durchaus das Potenzial zu einer echten Biogaspflanze hat (Abb. 19 und Abb. 20).



Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei der Wahl der entsprechenden Biogaspflanze den Standortgegebenheiten entscheidende Bedeutung zukommt.

3.2 Versuche zur Zweikulturnutzung

Im Zweitfruchtversuch wurden Mais und Sudangras jeweils in Hauptfruchtstellung sowie als Zweitfrucht nach verschiedenen Winterzwischenfrüchten an drei Standorten geprüft. Dabei kamen als Winterzwischenfrüchte Futterroggen und Landsberger Gemenge zum Anbau. Lediglich in Heßberg 2005 erfolgte die Prüfung der Zweitfrüchte nur nach Winterfutterroggen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse des ersten Versuchsjahres 2005 ist zu beachten, dass die im Versuch verwendeten Maissorten „Maibi“ (Hauptfrucht) und „Constantino“ (Zweitfrucht) in den jeweiligen Landessortenversuchen an den Standorten Heßberg und Kirchengel deutlich höhere Erträge aufwiesen als im hier vorgestellten Versuch.

3.2.1 Versuchsstandort Dornburg

Im ersten Versuchsjahr erwies sich der Mais am Standort Dornburg sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung dem Sudangras überlegen. Beide Fruchtarten zeigten in Hauptfruchtstellung bessere Ertragsergebnisse als in Zweitfruchtstellung. Erst die Kumulierung von Winterzwischenfrucht und Zweitfrucht brachte deutlich bessere Methanausbeuten als die reine Hauptfrucht.

Während Mais nach beiden Winterzwischenfrüchten, Winterfutterroggen (WFR) und Landsberger Gemenge (LG) in etwa die gleichen Erträge erreichte, reagierte das Sudangras negativ auf die letztgenannte Zwischenfrucht (Tab. 32).

Tabelle 32: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Dornburg 2005

| Substrat | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| Landsberger Gemenge | 16,6 | 560,65 | 307,12 | 79,3 | 24354,4 | |
| Winterfutterroggen | 16,5 | 609,84 | 340,69 | 62,6 | 21327,4 | |
| Mais Hauptfrucht | 30,9 | 562,78 | 305,98 | 165,1 | 50517,0 | |
| Mais auf LG | 28,8 | 566,63 | 308,80 | 146,2 | 45146,0 | 69500,4 |
| Mais auf WFR | 28,6 | 565,85 | 307,08 | 148,8 | 45693,4 | 67020,7 |
| Sudangras Hauptfrucht | 23,6 | 444,93 | 240,65 | 139,4 | 33546,9 | |
| Sudangras auf LG | 23,0 | 302,02 | 167,91 | 107,6 | 18067,1 | 42421,4 |
| Sudangras auf WFR | 22,9 | 439,50 | 237,37 | 121,0 | 28722,3 | 50049,7 |

Die Silierung wirkte sich positiv auf das Gesamtergebnis, also Winterzwischenfrucht und Hauptfrucht, aus (Tab. 33). Durch die Silierung wurden die theoretischen Methanerträge noch gesteigert bzw. blieben nahezu konstant. Eine Steigerung des Methangehaltes kann durch den Einsatz von Silierhilfsmitteln bedingt sein, der eine Aufspaltung der Rohfaser und eine bessere Nutzung von Stärke und Fett bewirkt.

Tabelle 33: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Silagen aus Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Dornburg 2005

| Substrat | oTS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|---------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| Landsb. Gemenge | 90,2 | 574,77 | 314,79 | 79,3 | 24963,0 | |
| Futterroggen (Vit.) | 90,7 | 868,99 | 522,23 | 62,6 | 32691,3 | |
| Mais Hauptfrucht | 96,0 | 533,58 | 290,69 | 165,1 | 47992,4 | |
| Mais auf LG | 95,8 | 552,05 | 300,17 | 146,2 | 43885,3 | 68848,3 |
| Mais auf WFR | 95,9 | 536,67 | 291,36 | 148,4 | 43238,5 | 75929,8 |
| Sudangras Hauptfrucht | 95,5 | 406,35 | 219,47 | 139,4 | 30593,9 | |
| Sudangras auf LG | 96,4 | 400,21 | 216,50 | 107,6 | 23295,1 | 48258,1 |
| Sudangras auf WFR | 94,1 | 409,25 | 221,09 | 121,0 | 26751,4 | 59442,7 |

Wie Tabelle 34 verdeutlicht, reichten die Erträge 2006 nicht an die des Jahres 2005 heran. Zurückzuführen ist dies hauptsächlich auf die geringeren Biomasseerträge der Winterzwischenfrüchte, aber auch Mais und Sudangras blieben unter den Ergebnissen des Vorjahres.

Tabelle 34: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Dornburg 2006

| Substrat | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| LG vor Sudangras | 16,1 | 556,7 | 307,7 | 59,2 | 18217,0 | |
| LG vor Mais | 16,6 | 556,7 | 307,7 | 58,1 | 17878,5 | |
| WFR vor Sudangras | 15,4 | 609,6 | 340,1 | 38,3 | 13025,8 | |
| WFR vor Mais | 15,5 | 609,6 | 340,1 | 41,2 | 14012,1 | |
| Mais Hauptfrucht | 33,4 | 561,9 | 307,2 | 147,8 | 45409,4 | |
| Mais auf LG | 33,0 | 562,4 | 305,9 | 138,1 | 42246,7 | 60125,2 |
| Mais auf WFR | 30,0 | 559,3 | 304,0 | 127,7 | 38816,6 | 52.828,7 |
| Sudangras Hauptfrucht | 26,6 | 452,6 | 247,0 | 88,8 | 21937,1 | |
| Sudangras auf LG | 24,7 | 452,9 | 246,9 | 94,0 | 23208,2 | 41425,1 |
| Sudangras auf WFR | 28,0 | 453,7 | 247,2 | 102,3 | 25292,3 | 38318,2 |

Die Methanerträge verlaufen relativ proportional zu den Ertragsergebnissen. Silierverluste sind bei allen Fruchtarten als gering einzuschätzen (Tab. 35).

Tabelle 35: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Silagen aus Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Zweitfruchtversuch Dornburg 2006

| Substrat | oTS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|---------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| LG vor Sudangras | 90,45 | 528,4 | 301,2 | 59,2 | 17830,3 | |
| LG vor Mais | 91,10 | 528,4 | 301,2 | 58,1 | 17498,9 | |
| WFR vor Sudangras | 93,62 | 536,4 | 303,6 | 38,3 | 11629,5 | |
| WFR vor Mais | 91,32 | 536,4 | 303,6 | 41,2 | 12510,1 | |
| Mais Hauptfrucht | 95,60 | 548,5 | 300,2 | 147,8 | 44372,6 | |
| Mais auf LG | 96,32 | 550,7 | 301,0 | 138,1 | 41571,4 | 59070,3 |
| Mais auf WFR | 94,96 | 551,7 | 301,4 | 127,7 | 38485,2 | 50995,3 |
| Sudangras Hauptfrucht | 95,63 | 450,2 | 246,7 | 88,8 | 21910,8 | |
| Sudangras auf LG | 94,93 | 450,7 | 245,3 | 94,0 | 23058,5 | 40888,8 |
| Sudangras auf WFR | 95,60 | 452,3 | 245,5 | 102,3 | 25112,0 | 36741,5 |

Die Biomasseerträge bei Mais sind 2006 sowohl im Anbau als Hauptfrucht als auch als Zweitfrucht auf LG und WFR geringer als im Versuchsjahr 2005, verhalten sich aber in der Relation

wie im Vorjahr (Abb. 21). So erreichte der Mais in beiden Jahren als Hauptfrucht höhere Erträge als in Zweitfruchtstellung.

Die niedrigen Erträge des Sudangrases in Hauptfruchtstellung 2006 begründen sich in den ungünstigen Temperaturbedingungen bei der früheren Saat der Hauptfrucht. Es herrschten zu diesem Zeitpunkt Bodentemperaturen von unter 12 °C, die ein zügiges Keimen des Saatgutes nicht zuließen. Das nach der Ernte der Winterzwischenfrüchte etwa 14 Tage später gesäte Sudangras entwickelte sich besser, verlor dennoch gegenüber den Erträgen des Jahres 2005, was an den trockenen Bedingungen im Juni/Juli 2006 lag. Erneut war jedoch der Winterfutterroggen die bessere Winterzwischenfrucht für Sudangras (Abb. 21).

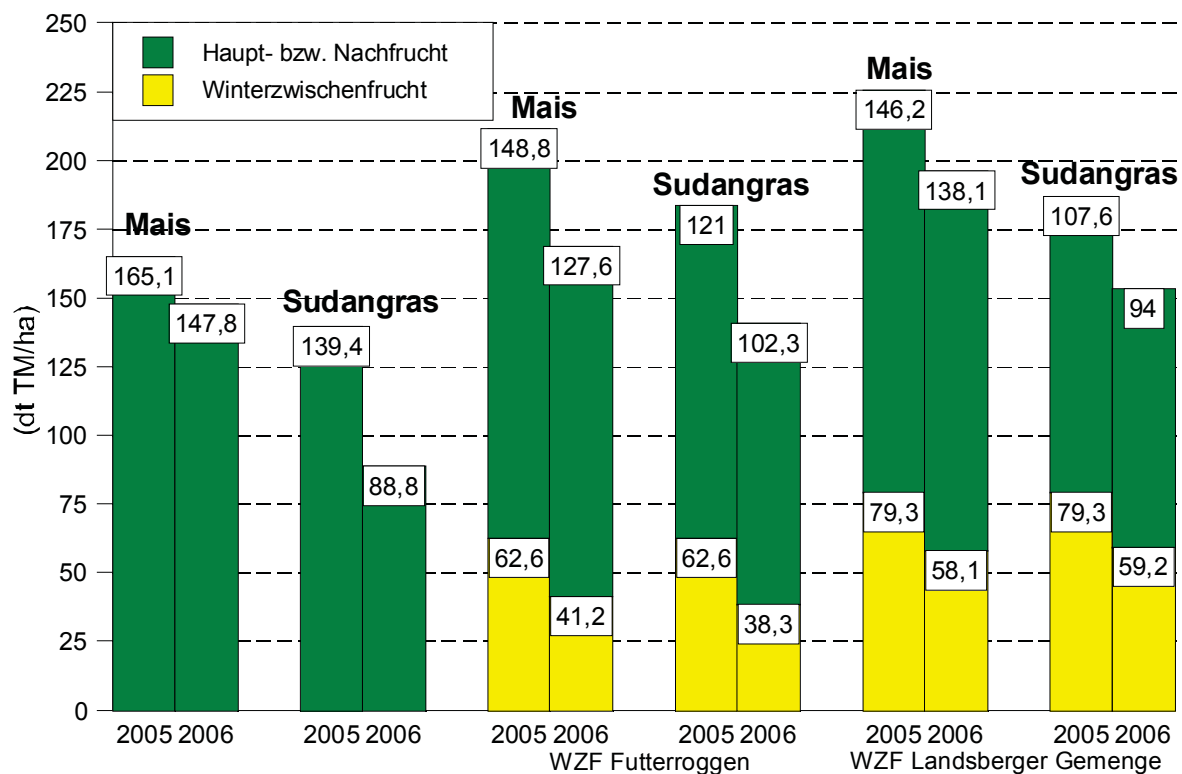


Abbildung 21: Erträge von Mais und Sudangras in Haupt- bzw. Zweitfruchtstellung nach Futterroggen und Landsberger Gemeinde, VS Dornburg 2005 und 2006

3.2.2 Versuchsstandort Heßberg

Am Standort Heßberg wurde im ersten Versuchsjahr nur Futterroggen als Winterzwischenfrucht geprüft. Nach der Ernte des Futterroggens kamen die Zweitfrüchte Mais und Sudangras zu zwei unterschiedlichen Terminen zur Aussaat.

Erstaunlicherweise war die Ertragshöhe beider Fruchtarten sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung annähernd identisch, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau (Tab. 36). Dahingegen erreichte die im besprochenen Versuch in Zweitfruchtstellung angebaute Maissorte „Constantino“ im Landessortenversuch (LSV) in Heßberg 196,5 dt TM/ha, der Durchschnittsertrag des LSV lag bei 183,4 dt TM/ha.

Tabelle 36: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Heßberg 2005

| Substrat | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ernteertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-------------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Winterfutterroggen | 17,0 | 528,41 | 292,70 | 31,6 | 9249,2 | |
| Winterfutterroggen | 19,8 | 528,41 | 292,70 | 50,0 | 14634,8 | |
| Mais Hauptfrucht | 34,3 | 563,58 | 307,91 | 130,7 | 40243,9 | |
| Mais auf WFR 1.T | 33,8 | 564,19 | 308,52 | 132,5 | 40878,5 | 50127,7 |
| Mais auf WFR 2.T | 30,0 | 563,35 | 307,79 | 135,4 | 41674,7 | 56309,6 |
| Sudangras Hauptfrucht | 22,9 | 453,82 | 246,28 | 133 | 32754,8 | |
| Sudangras auf WFR 1. T. | 22,7 | 453,58 | 245,83 | 135,4 | 33285,5 | 42534,7 |
| Sudangras auf WFR 2. T. | 23,6 | 452,29 | 246,38 | 147,3 | 36291,7 | 50926,5 |

Im Versuchsjahr 2006 (Tab. 37) zeigte sich ein völlig anderes Versuchsbild als 2005. Während sich die Erträge beim Mais und auch beim Sudangras sowohl in der Hauptfruchtstellung als auch in der Zweitfruchtstellung auf Futterroggen fast ähnelten, ist zu erkennen, dass beide Fruchtarten nach Landsberger Gemeinde deutliche Ertragseinbußen hatten. Dies ist begründet durch den sehr hohen Wasserbedarf dieser Winterzwischenfrucht.

Tabelle 37: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Heßberg 2006

| Substrat | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| LG vor Sudangras | 12,9 | 556,7 | 307,8 | 66,9 | 20593,7 | |
| LG vor Mais | 13,8 | 556,7 | 307,8 | 69,6 | 21424,8 | |
| WFR vor Sudangras | 16,7 | 609,8 | 340,1 | 65,4 | 22243,1 | |
| WFR vor Mais | 15,7 | 609,8 | 340,1 | 60,7 | 20644,6 | |
| Mais Hauptfrucht | 31,1 | 563,4 | 306,4 | 206,6 | 63306,4 | |
| Mais auf LG | 22,5 | 550,6 | 296,5 | 150,0 | 44476,3 | 65901,1 |
| Mais auf WFR | 29,3 | 562,1 | 304,2 | 189,3 | 57587,0 | 78231,6 |
| Sudangras Hauptfrucht | 23,6 | 453,0 | 245,0 | 166,1 | 40690,1 | |
| Sudangras auf LG | 18,9 | 453,1 | 246,6 | 129,6 | 31962,7 | 52556,0 |
| Sudangras auf WFR | 20,9 | 453,5 | 245,3 | 153,6 | 37672,0 | 59925,1 |

Beim Vergleich von Mais und Sudangras in Hauptfruchtstellung und dem kumulierten Ertrag mit WFR und LG ist ein Anstieg der Biomasseleistung aller Fruchtarten zu erkennen. Eine Ausnahme bildet das Sudangras im 2. Anbaujahr, wo sehr deutlich der hohe Wasserbedarf des LG gegenüber dem 2005 alleinig als Vorfrucht angebauten WFR zu sehen ist. Während Mais und Sudangras im ersten Versuchsjahr fast auf dem gleichen Ertragsniveau lagen, war der Mais dem Sudangras 2006 in allen Varianten überlegen (Abb. 22).

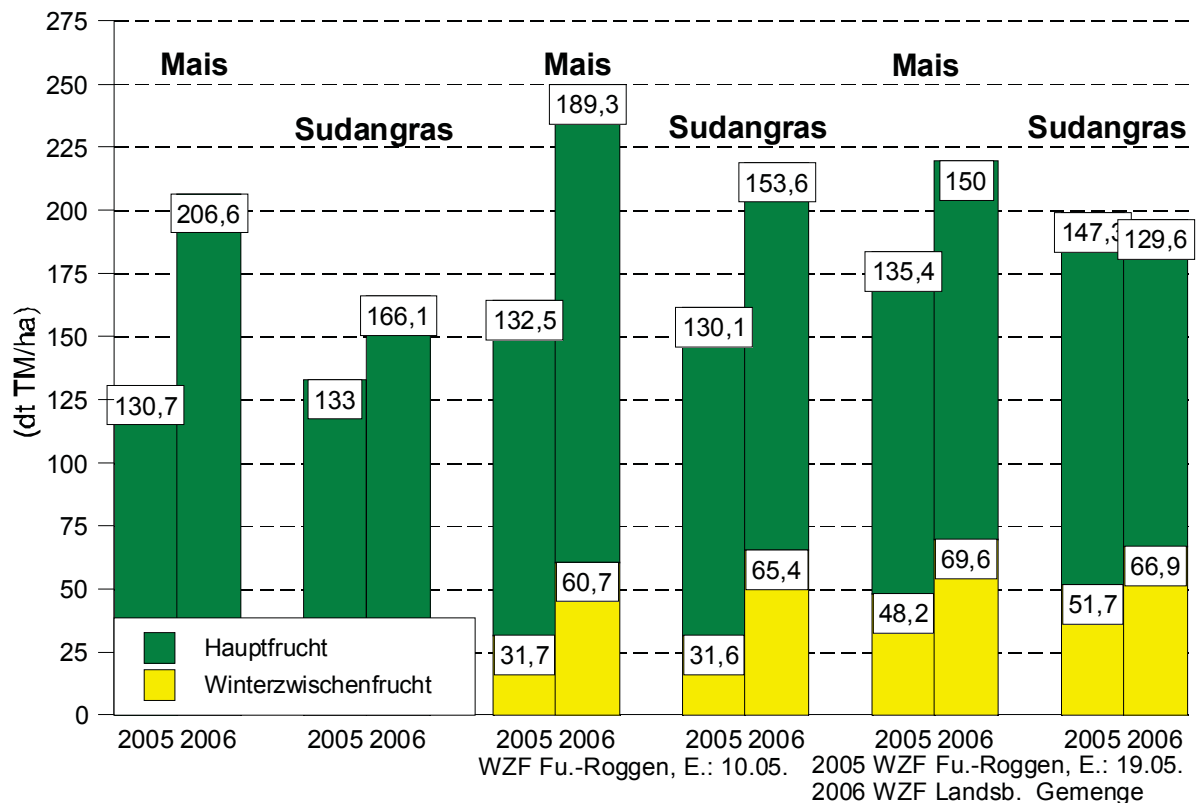


Abbildung 22: Erträge von Mais und Sudangras in Haupt- bzw. Zweitfruchtstellung nach Futterroggen (2005: 2. Erntetermine) und Landsberger Gemeinde, VS Heßberg 2005 und 2006

3.2.3 Versuchsstandort Kirchengel

Wie bereits am Standort Heßberg diskutiert, reichten die Maiserträge des Zweitfruchtversuchs 2005 auch in Kirchengel nicht an die der entsprechenden LSV heran. Hier wurden im LSV Silomais früh durchschnittlich 152,1 dt TM/ha ermittelt, die Sorte „Constantino“ wies 161,7 dt TM/ha auf. Im LSV Silomais mittelfrüh, in dem auch die im besprochenen Versuch in Hauptfruchtstellung geprüfte Sorte „Maibi“ stand, lag der Durchschnittsertrag bei 149,4 dt TM/ha, wobei „Maibi“ mit 153,0 dt TM/ha ebenfalls das Versuchsmittel übertraf.

Im Jahr 2005 wies das Sudangras sowohl als Zweitfrucht nach Landsberger Gemeinde als auch in Hauptfruchtstellung höhere Erträge auf als Mais, wobei das Ertragsniveau bei ca. 130 dt TM/ha lag. Als Zweitfrucht nach Futterroggen erzielte Sudangras deutlich niedrigere Erträge als in den o. g. zwei Varianten. Der Mais dagegen erreichte als Zweitfrucht nach Futterroggen in etwa den gleichen Ertrag wie in Hauptfruchtstellung, nach Landsberger Gemeinde war der Ertrag deutlich niedriger (Tab. 38).

Tabelle 38: Biogas- und Methanausbeuten sowie Methanerträge verschiedener Biomassepflanzen in Haupt- und Zweitfruchtstellung, VS Kirchengel 2005

| Substrat | TS (%) | Biogas (l/kg oTS) | Methan (l/kg oTS) | Ertrag (dt oTS/ha) | Methanertrag (l/oTS/ha) | Summe ZF (l/oTS/ha) |
|-----------------------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|
| Landsb. Gemenge | 14,8 | 550,72 | 309,61 | 25,6 | 7925,9 | |
| Futterroggen (Vit.) | 16,3 | 602,70 | 336,57 | 81,8 | 27531,6 | |
| Mais Hauptfrucht | 30,2 | 567,48 | 308,95 | 103,6 | 32006,9 | |
| Mais auf LG | 30,4 | 569,87 | 310,77 | 77,0 | 23929,5 | 31855,4 |
| Mais auf WFR | 30,6 | 567,41 | 308,42 | 101,0 | 31150,2 | 58681,8 |
| Sudangras Hauptfrucht | 25,1 | 452,61 | 244,93 | 134,3 | 32893,8 | |
| Sudangras auf LG | 28,8 | 453,31 | 244,41 | 127,0 | 31040,0 | 38965,9 |
| Sudangras auf WFR | 26,8 | 454,04 | 244,55 | 96,5 | 23598,7 | 51130,3 |

Die bereits obig erläuterten Ergebnisse sind in Abbildung 23 nochmals graphisch dargestellt. Im Gegensatz zu den Versuchen in Heßberg zeigt das Sudangras in Kirchengel als Zweitfrucht nach LG deutlich bessere Biomasseerträge als der Mais. Genau gegensätzlich verhalten sich die Nachfrüchte beim Anbau nach Winterfutterroggen.

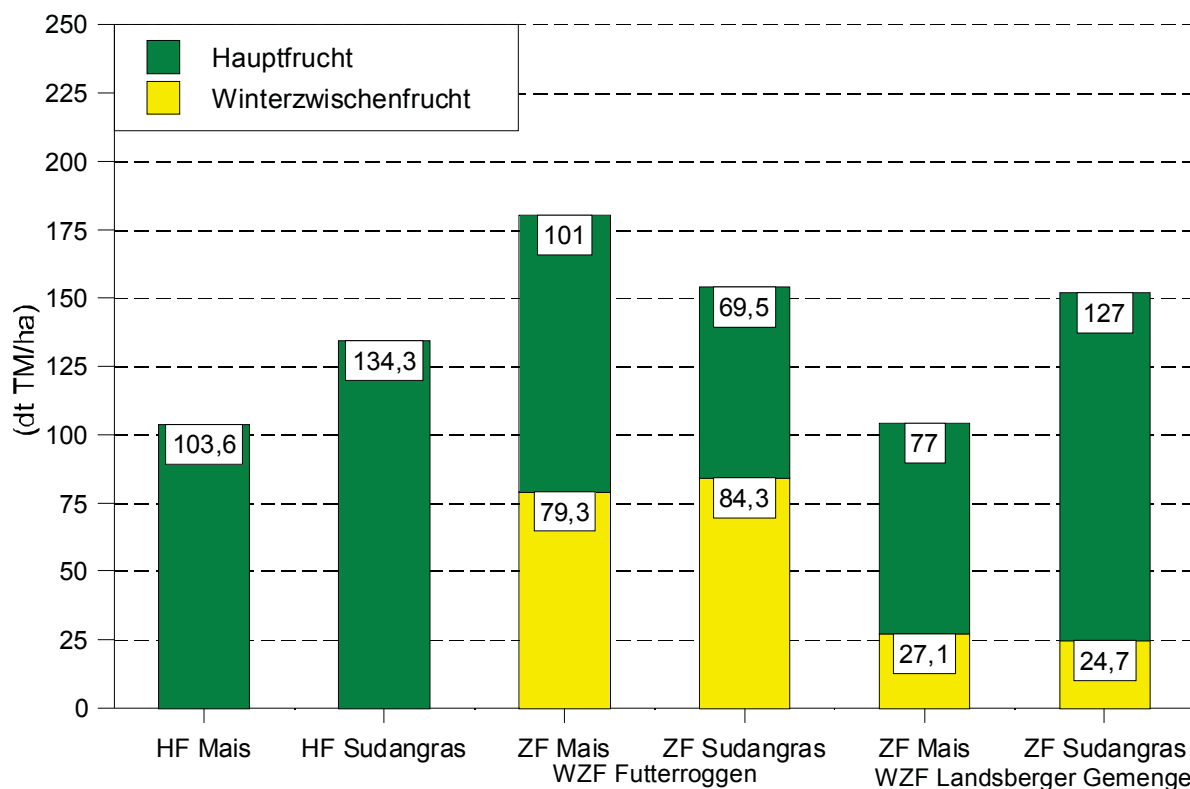


Abbildung 23: Erträge von Mais und Sudangras in Haupt- bzw. Zweitfruchtstellung nach Futterroggen und Landsberger Gemenge, VS Kirchengel 2005

Am Standort Kirchengel konnte der Versuch nur im Jahr 2005 ausgewertet werden, da 2006 das Sudangras, wahrscheinlich wegen ungünstiger Witterungsbedingungen, insbesondere niedrigen Temperaturen, zur Aussaat, nicht aufief.

Im Mittel beider Jahre und Standorte übertrifft der Mais das Sudangras sowohl in Hauptfruchtstellung als auch nach beiden Winterzwischenfrüchten (Abb. 24). Es ist aber zu beachten, dass der Versuch jeweils einheitlich zum Termin der Silomaisreife beerntet wurde. Das Sudangras war zu diesem Zeitpunkt noch relativ feucht und wies TS-Gehalte um 25 % auf. Möglicherweise wäre bei einem späteren Erntetermin bei den Sudangrasprüfglieder noch ein Ertragszuwachs erfolgt.

Die Streuung der Werte verdeutlicht gleichzeitig aber auch die großen Unterschiede der Jahre und Standorte, insbesondere in Hinblick auf die Witterungsbedingungen und die Wasserversorgung. Für grundlegende Aussagen sind weitere Untersuchungen dringend erforderlich.

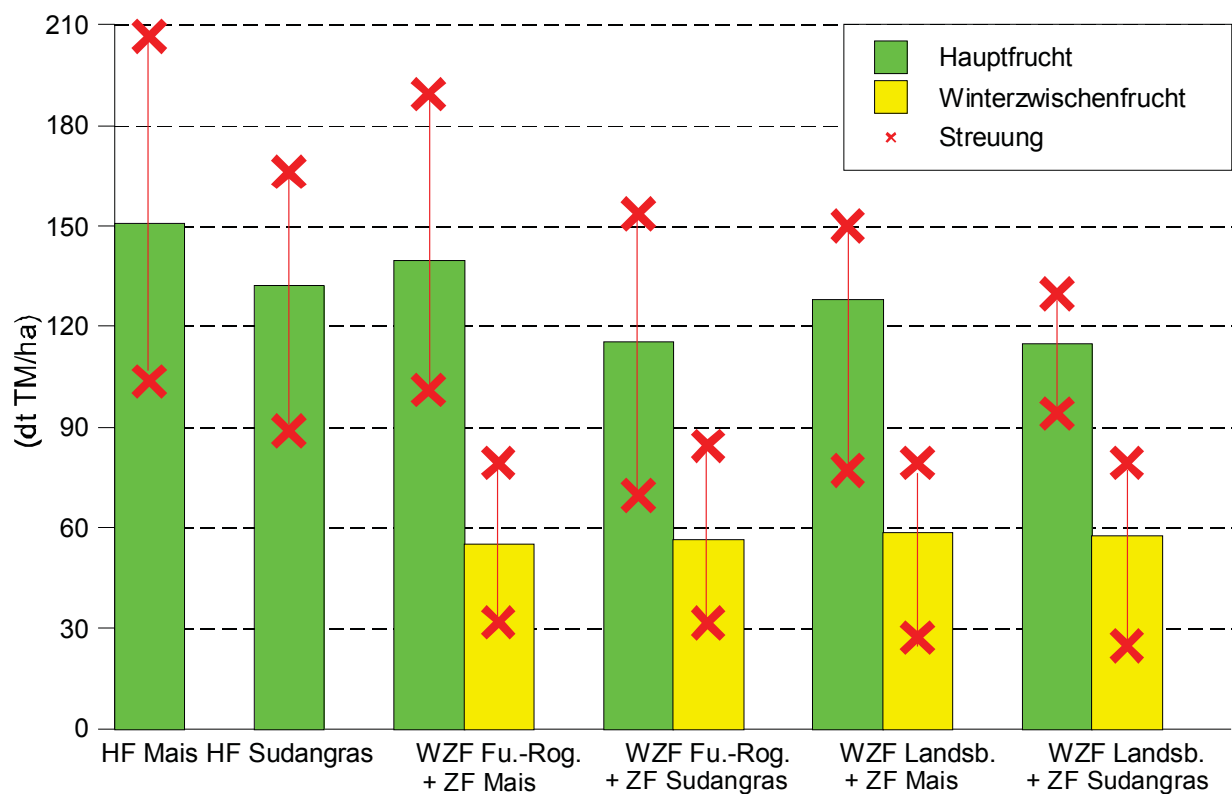


Abbildung 24: Erträge von Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung, Mittel der Jahre und Standorte

3.3 Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras

Am Standort Heßberg wurde im Zweitfruchtversuch 2005 der Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Wuchshöhe von Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung (später Aussattermin) untersucht (Abb. 25).

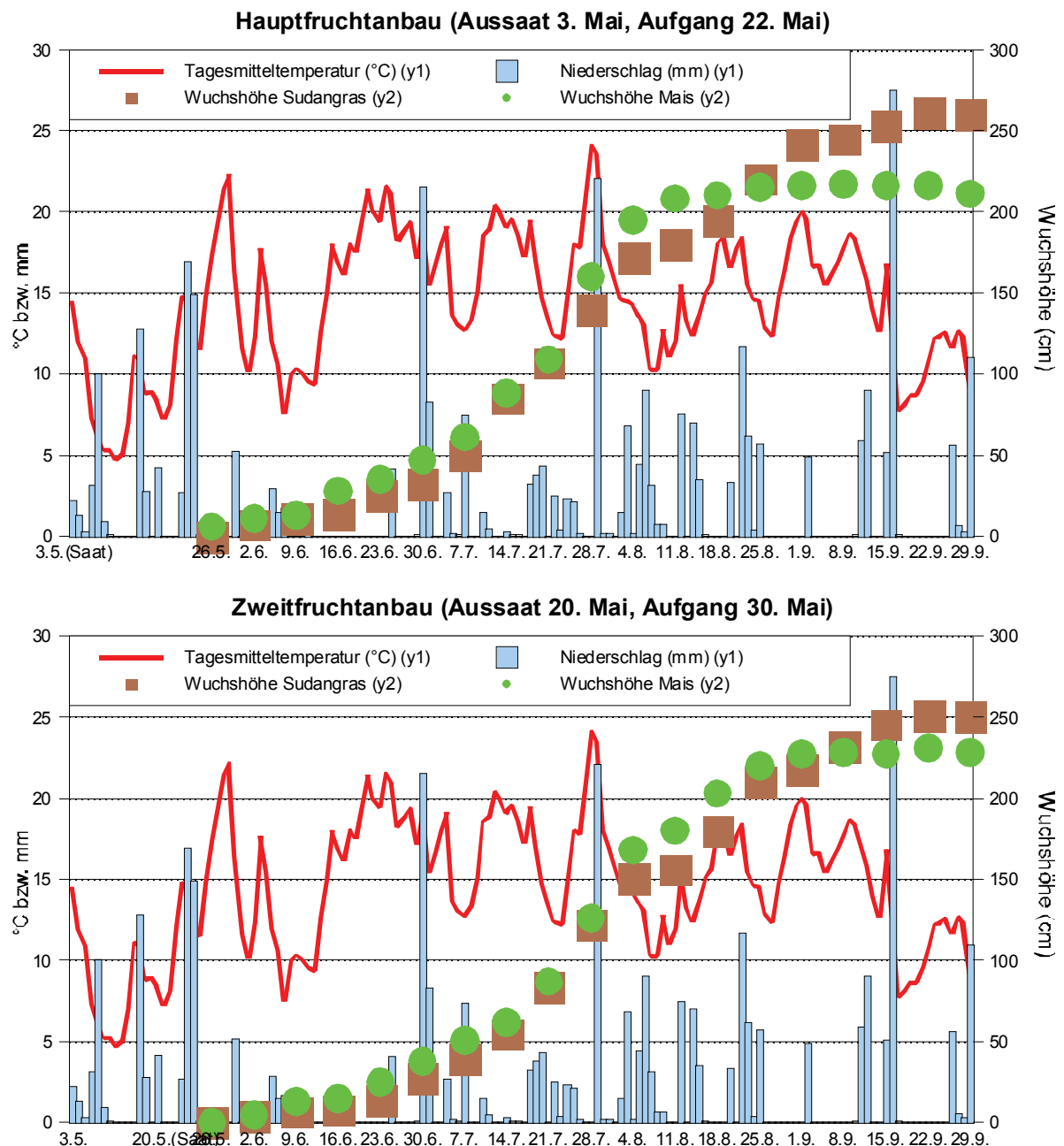


Abbildung 25: Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Wuchshöhe von Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung nach Futterroggen, VS Heßberg 2005

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, liefen Mais und Sudangras sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung zum gleichen Zeitpunkt auf, was an den ungünstigen Witterungsbedingungen zum Aussaatzeitpunkt der Hauptfrucht lag. Im Hauptfruchtanbau stagnierte das Längenwachstum des Sudangrases ab dem 25. August. Zu diesem Zeitpunkt setzten die Blüte und anschließende Kornfüllung ein. In Zweitfruchtstellung stellte Sudangras sein Längenwachstum erst Mitte September ein, so dass durch eine längere Vegetationszeit durch Verschiebung der Ernte in den Oktober der Ertrag möglicherweise noch gesteigert werden könnte. Mais hingegen zeigte sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung einen fast identischen Wachstumsverlauf. Die Kolbenbildung, zu erkennen an der Stagnation des Längenwachstums, begann in beiden Varianten um den 25. August.

Die Ergebnisse des Jahres 2005 gaben den Anstoß, die Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras in einem Exaktversuch am Standort Dornburg 2006 näher zu untersuchen. Hierzu wurden Mais und Sudangras zu zwei unterschiedlichen Terminen ausgesät, wobei der erste Termin mit der Aussaat in Hauptfruchtstellung (Ende April), der zweite mit einem Anbau in Zweitfruchtstellung (Mitte Mai) zusammenfiel. Bei Zeiternten alle zwei Wochen ab Anfang Juli wurden die Wuchshöhe, der Ertrag und der TS-Gehalt bestimmt.

Wie Abbildung 26 zeigt, entwickelten sich Mais und Sudangras nicht wie im Vorjahr in Heßberg parallel zueinander. Beim Mais setzte zu beiden Aussaatterminen nach der ersten Junidekade ein sprunghaftes Längenwachstum ein. Dieser Wachstumsschub fiel mit hohen Temperaturen in dieser Zeitspanne zusammen.

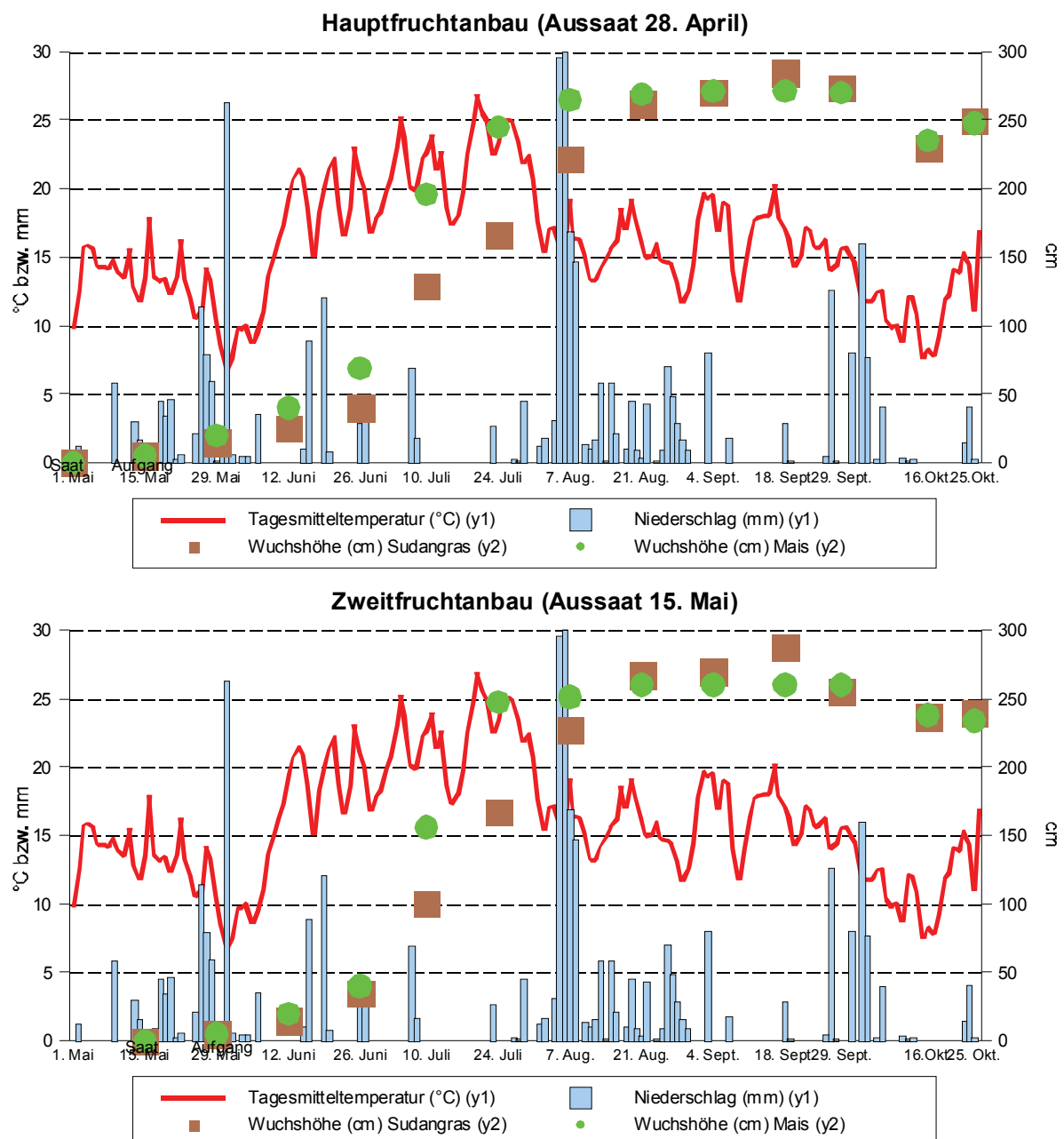


Abbildung 26: Entwicklung der Wuchshöhe von Mais und Sudangras in Abhängigkeit von Aussaattermin und Witterungsverhältnissen, VS Dornburg 2006

Das Sudangras wuchs dagegen kontinuierlich und holte den Mais im der Wuchshöhe Ende August wieder ein. Die Pflanzenlängen beider Fruchtarten unterschieden sich in Haupt- und Zweitfruchtstellung kaum voneinander. Auffallend ist, dass weder Mais noch Sudangras im Juni/Juli, als sehr hohe Temperaturen herrschten und über nahezu sechs Wochen kaum Niederschläge fielen, das Wachstum einstellten. Nach einem Maximum um den 20. September ging die Wuchshöhe wieder leicht zurück, was auf ein Fahrenknicken beim Mais und die Samenreife beim Sudangras zurückzuführen ist.

Wie Abbildung 27 und Tabelle 39 veranschaulichen, stieg der Ertrag beim Mais sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung kontinuierlich an und erreichte sein Optimum zwischen Anfang und Mitte September. Zu diesem Zeitpunkt wies er auch TS-Gehalte auf, die eine sichere Silierung zuließen. Bereits Ende September stiegen die TS-Gehalte über 35 % an, der Mais hätte dann sehr hohe Rohfasergehalte aufgewiesen und wäre schlecht silierbar gewesen.

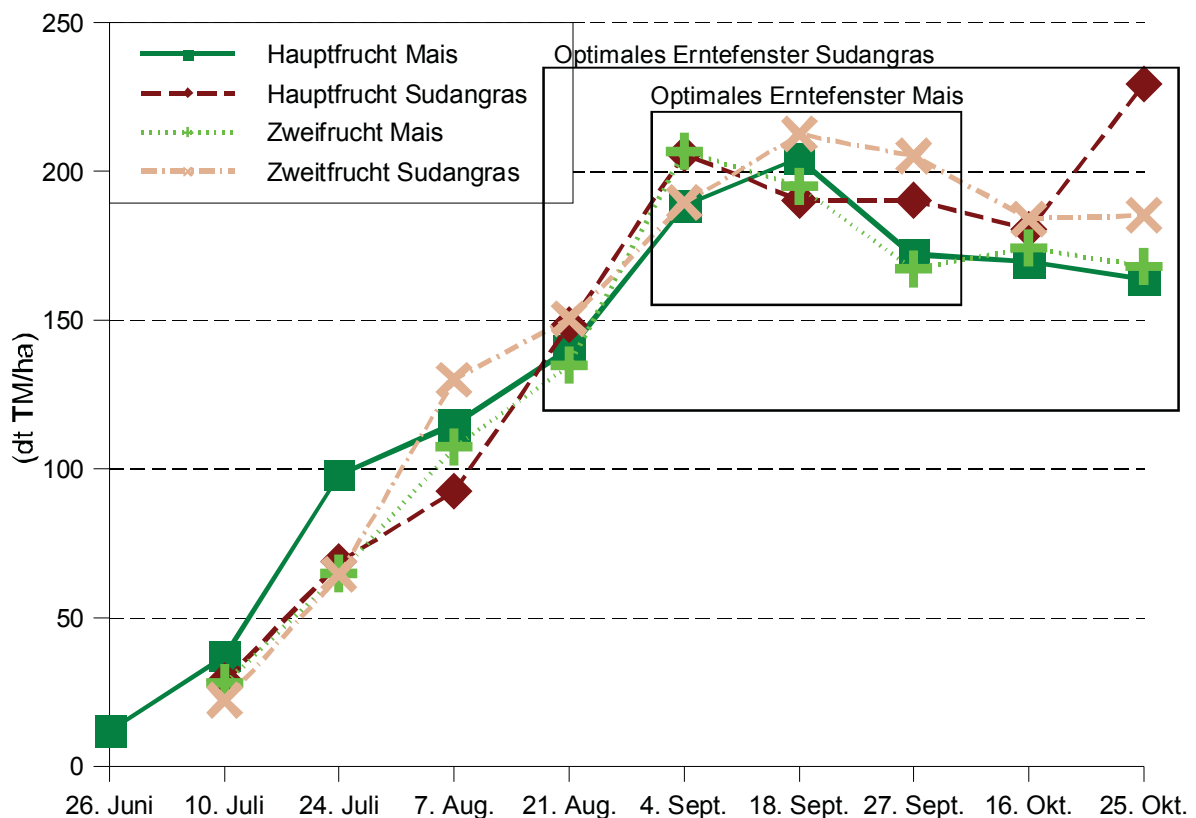


Abbildung 27: Entwicklung der Trockenmasseerträge von Mais und Sudangras in Abhängigkeit vom Aussaat-termin, VS Dornburg 2006

Tabelle 39: Ertragsentwicklung von Mais und Sudangras in Abhängigkeit vom Aussaattermin, VS Dornburg 2006

| Erntetermin | Wuchshöhe (cm) | TS (%) | Ertrag (dt TM/ha) | Wuchshöhe, 2. Aufwuchs (cm) | TS, 2. Aufwuchs (%) | Ertrag, 2. Aufwuchs (dt TM/ha) | Gesamtertrag (dt TM/ha) |
|-------------------------------|-------------------|-----------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Mais Hauptfruchtstellung | | | | | | | |
| 26.06.06 | 68,8 | 13,9 | 12,1 | Kein Wiederaufwuchs | | | 12,1 |
| 10.07.06 | 196,3 | 12,1 | 37,2 | | | | 37,2 |
| 24.07.06 | 245,0 | 21,2 | 97,8 | | | | 97,8 |
| 07.08.06 | 265,0 | 23,4 | 114,8 | | | | 114,8 |
| 21.08.06 | 268,8 | 25,6 | 140,1 | | | | 140,1 |
| 04.09.06 | 271,3 | 37,7 | 188,4 | | | | 188,4 |
| 18.09.06 | 271,3 | 35,3 | 204,3 | | | | 204,3 |
| 27.09.06 | 270,0 | 37,3 | 172,0 | | | | 172,0 |
| 16.10.06 | 235,5 | 43,9 | 169,5 | | | | 169,5 |
| 25.10.06 | 247,8 | 46,3 | 163,8 | | | | 163,8 |
| Mais Zweitfruchtstellung | | | | | | | |
| 10.07.06 | 156,3 | 9,8 | 28,3 | Kein Wiederaufwuchs | | | 28,3 |
| 24.07.06 | 247,5 | 16,9 | 64,7 | | | | 64,7 |
| 07.08.06 | 251,3 | 21,3 | 107,5 | | | | 107,5 |
| 21.08.06 | 260,0 | 22,8 | 134,9 | | | | 134,9 |
| 04.09.06 | 260,0 | 34,5 | 206,7 | | | | 206,7 |
| 18.09.06 | 260,0 | 37,1 | 194,9 | | | | 194,9 |
| 27.09.06 | 260,0 | 36,2 | 167,1 | | | | 167,1 |
| 16.10.06 | 238,3 | 38,9 | 174,4 | | | | 174,4 |
| 25.10.06 | 233,8 | 44,4 | 168,2 | | | | 168,2 |
| Sudangras Hauptfruchtstellung | | | | | | | |
| 10.07.06 | 128,8 | 17,5 | 28,8 | 223,0 | 23,8 | 100,2 | 129,0 |
| 24.07.06 | 166,3 | 18,9 | 68,6 | 209,3 | 21,4 | 99,8 | 168,4 |
| 07.08.06 | 222,5 | 25,0 | 92,6 | 140,8 | 20,3 | 36,1 | 128,7 |
| 21.08.06 | 262,5 | 28,1 | 148,3 | 113,3 | 17,5 | 34,1 | 182,4 |
| 04.09.06 | 270,0 | 32,6 | 206,0 | 92,3 | 19,8 | 33,0 | 239,0 |
| 18.09.06 | 285,0 | 34,2 | 190,4 | Kein erntewürdiger Wiederaufwuchs | | | 190,4 |
| 27.09.06 | 273,8 | 34,8 | 190,2 | | | | 190,2 |
| 16.10.06 | 230,0 | 31,7 | 180,6 | | | | 180,6 |
| 25.10.06 | 249,5 | 30,6 | 229,3 | | | | 229,3 |
| Sudangras Zweitfruchtstellung | | | | | | | |
| 10.07.06 | 101,3 | 15,7 | 22,2 | 232,0 | 26,5 | 97,5 | 119,7 |
| 24.07.06 | 167,5 | 19,8 | 64,4 | 209,3 | 23,0 | 91,0 | 155,5 |
| 07.08.06 | 227,5 | 24,8 | 129,9 | 138,0 | 19,4 | 34,5 | 164,4 |
| 21.08.06 | 267,5 | 26,0 | 150,6 | 112,3 | 19,6 | 33,9 | 184,5 |
| 04.09.06 | 270,0 | 31,5 | 189,5 | 93,3 | 19,2 | 31,0 | 220,5 |
| 18.09.06 | 287,5 | 31,6 | 212,6 | Kein erntewürdiger Wiederaufwuchs | | | 212,6 |
| 27.09.06 | 255,0 | 33,0 | 205,1 | | | | 205,1 |
| 16.10.06 | 236,8 | 31,3 | 184,0 | | | | 184,0 |
| 25.10.06 | 240,0 | 33,2 | 185,3 | | | | 185,3 |

Auch beim Sudangras entwickelte sich der Ertrag relativ konstant bis Anfang September und blieb dann bei beiden Aussaatterminen relativ konstant auf hohem Niveau, wobei die Ertrags-
höhe in etwa auf dem gleichen Niveau wie beim Mais lag. Der Ertragszuwachs beim Aussaat-

termin in Hauptfruchtstellung ist durch die Samenbildung in den Rispen zurückzuführen. Ab Anfang September erreichte das Sudangras auch die für die Silierung erforderlichen TS-Gehalte. Im Gegensatz zum Mais stieg die TS jedoch bis zur letzten Ernte Ende Oktober nicht über 35 % an, so dass das optimale Erntefenster beim Sudangras über fast sechs Wochen reichte. Beim Mais waren es nur drei Wochen. Sollten sich diese Ergebnisse in weiterführenden Versuchen bestätigen, würde dies für den Landwirt deutliche arbeitswirtschaftliche Vorteile haben. Die Arbeitsspitze der Silomaisernte, die sich mit der Aussaat von Wintergerste und der Aussaatvorbereitung für Winterweizen überschneidet, könnte durch einen teilweisen Ersatz des Maises für die Biogasanlage durch Sudangras bzw. andere Sorghumhirsen entschärft werden, da man diese zum technologisch günstigen Zeitpunkt ernten kann.

Anders als Mais treibt Sudangras nach der Ernte wieder aus. Bei den Ernten bis Anfang September erfolgte noch ein erntewürdiger Wiederaufwuchs, der beim letzten Schnitttermin Ende Oktober nochmals beerntet wurde. Allerdings übertrafen die Gesamterträge der zweischnittigen Nutzung die der einmal geernteten Prüfglieder nicht signifikant. Auch die TS-Gehalte entsprachen bei beiden Schnitten nicht den Anforderungen, so dass nach bisherigem Kenntnisstand eine Zweischnittnutzung des Sudangrases kaum sinnvoll ist.

3.4 Herbizidversuche

Entscheidend für einen wirtschaftlichen Anbau der einzelnen Kulturen ist ein effizienter Pflanzenschutz, vor allem bezüglich der Bekämpfung von Unkräutern im Jungpflanzenstadium.

Da insbesondere in Topinambur und Durchwachsener Silphie keinerlei Pflanzenschutzmittel zugelassen sind, wurde in der VS Dornburg in den Jahren 2005 und 2006 Herbizidversuche zu diesen Kulturen durchgeführt.

Topinambur

Hier kamen im ersten Jahr, neben einer unbehandelten Kontrolle, eine Variante mit dem Vorsaateinarbeitungs herbizid Treflan, eine Spritzfolge mit Stomp SC im Voraufbau und Boxer im Nachaufbau sowie eine Nachaufbauspritzung mit Kontakt 320 SC zur Anwendung. Die Auswahl dieser, hauptsächlich gegen zweikeimblättrige Unkräuter wirkenden, Mittel erfolgte anhand der in anderen Korbblütlern, z. B. Sonnenblume, zugelassenen Herbizide. Zusätzlich wurde das Graminizid Gallant Super geprüft.

Nach der Pflanzung im April entwickelte sich der Topinambur nur sehr zögerlich. Dies lag an der kühlen, trockenen Witterung. Nur ganz vereinzelt liefen Pflanzen auf, so dass am 12.05.2005 entschieden wurde, die fehlenden Knollen nachzulegen. Dadurch blieben die Pflanzen während der gesamten Versuchsdauer in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Durch das Nachpflanzen wurde der Spritzfilm von Basta (Var. 3) zerstört, so dass die Wirkung dieses Mittels daraufhin nicht ausreichend war. Trotzdem war die Wirkung der Spritzfolge in Variante 3 zufriedenstellend. Kontakt 320 SC und Treflan konnten als Solo-Varianten (auch dem langen Zeitraum durch das doppelte Legen geschuldet) nicht überzeugen. Gallant Super wirkte erwartungsgemäß gegen Ungräser. Phytotoxizität trat an der Kultur nicht auf (Tab. 40).

Tabelle 40: Wirkung und Verträglichkeit von Herbiziden in Topinambur, VS Dornburg 2005

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------|--|-----------|-------------------|-------|--------------|--------|------------------|
| Versuch: Herbizidvergleich | | | Kultur: Topinambur | | | | | | |
| Versuchsort: | Versuchsstation Dornburg | | | | Versuchsbetreuer: | | Frau Ormerod | | |
| Sorte: | Gute Gelbe | | | | Bodenart/-zahl: | | Lehm/62 | | |
| Vorfrucht: | Sommergerste | | | | N-Düngung: | | 145 kg/ha | | |
| Pflanzung: | 06.04./12.05. | | | | Ernte: | | - | | |
| Variante | Anwendung | | Wirkungsgrad in % (UK = Deckungsgrad in %) | | | | | | Phytotox in % |
| | | | Bonitur: 13.06.2005 | | | | | | |
| | l/ha | Datum/ES | POLSS | CHEA L | THLA R | FUMOF | HERBA/SG | GESAMT | |
| 1 UK | - | - | 11 | 2 | 5 | 2 | 11 | 31 | |
| 2 Treflan | 2,0 | 05.04/VSE | 0 | 0 | 60 | 13 | 33 | | |
| 3 SF | 3,0 | 09.05/VA | 60 | 100 | 80 | 100 | 80 | | |
| Basta + Stomp SC | 3,0 | 31.05/20 | | | | | | | |
| 4 Kontakt 320 SC | 2,0 | 31.05./20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 5 Gallant Super | 1,0 | 31.05./20 | | | | | 90 | | |
| HERBA: VIOSS | | | | | | | | | |

Bei der Wiederholung des Versuches 2006 kamen die wirksamsten Mittel der Prüfung 2005 erneut zum Einsatz. Erschwert wurde der Versuch durch die niedrigen Temperaturen und die Trockenheit nach dem Legen der Knollen, die den Austrieb lange verzögerten. Auf der gesamten Versuchsfläche liefen jedoch zahlreiche Disteln auf, so dass am 12.05. der gesamte Versuch mit Roundup gespritzt wurde.

Nach dem Spritzen der Versuchsvarianten zeigten die Varianten 2 (Tankmischung Boxer + Stomp SC) und 3 (Spritzfolge Vorsaateinarbeitung Treflan + Stomp SC im Nachauflauf) die beste Wirkung. Gegen die zweite Distelwelle hatten die Mittel jedoch keine Chance. Die hohe Wüchsigkeit des Topinambur konnte jedoch diesen erneuten Unkrautdruck überwinden.

Schäden zeigten sich beim Einsatz von Stomp SC. Sowohl in der Tankmischung mit Boxer als auch in der Soloanwendung kam es zu einer Wuchsdepression bei Einzelpflanzen bis zu 80 %, im Durchschnitt der gesamten Parzellen von 10 bis 20 %. Weiterhin waren die Pflanzen in diesen Varianten aufgehellte und es wurde eine leichte Ausdünnung im Prüfglied 3 bonitiert (Tab. 41).

Tabelle 41: Wirkung und Verträglichkeit von Herbiziden in Topinambur, VS Dornburg 2006

| Versuch: Herbizidvergleich | | | | | Kultur:Topinambur | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------|--|-------|-------------------|--------------|-------|--------|------------------|
| Versuchsort: | Versuchsstation Dornburg | | | | Versuchsbetreuer: | Frau Ormerod | | | |
| Sorte: | Gute Gelbe | | | | Bodenart/-zahl: | Lehm/62 | | | |
| Vorfrucht: | Sommergerste | | | | N-Düngung: | 149 kg N/ha | | | |
| Pflanzung | 26.04. | | | | Ernte: | - | | | |
| Variante | Anwendung | | Wirkungsgrad in % (UK = Deckungsgrad in %) | | | | | | Phytotox in % |
| | | | Bonitur: 27.06.2006 | | | | | | |
| | l/ha | Datum/ES | CIRSS | THLAR | CHEAL | VERSS | HERBA | GESAMT | |
| 1 UK | - | - | 17 | 2 | 3 | 2 | 2 | 26 | 0 |
| 2 TM Boxer + Stomp SC | 3,0+ 3,0 | 09.06/NA | 0 | 65 | 60 | 40 | 65 | | 72/12 WD |
| 3 SF Treflan + Stomp SC | 2,0 3,5 | 26.04/VSE 09.06/NA | 0 | 60 | 80 | 60 | 70 | | 80/20 WD, 3A |
| 4 Treflan | 2,0 | 26.04/VSE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| HERBA: GALAP, FUMOF, SOLNI | | | | | | | | | |

Der im Versuchsplan angedachte Einsatz der Maschinenhacke war nicht mehr möglich, da die Pflanzen bereits zu groß waren und der Wurzelbereich massiv geschädigt worden wäre. Generell ist die Anwendung mechanischer Pflegemaßnahmen in Topinambur schwierig, da damit immer eine Beeinträchtigung der Knollen einhergeht.

Insgesamt ist festzustellen, dass beim Anbau von Topinambur in normalen Jahren auf Feldern mit durchschnittlichem Unkrautbesatz die Anwendung eines Vorsaateinarbeitungs herbizides und eines Mittels im Nachauflauf ausreicht, um den Jungpflanzen des Topinambur günstige Entwicklungsmöglichkeiten zu schaffen. Wichtig ist es, Wurzelunkräuter, insbesondere Disteln, in der Vorfrucht zu bekämpfen, da diese in der Kultur im Nachauflauf nicht bekämpfbar sind.

Durchwachsene Silphie

Da die Durchwachsene Silphie ebenso wie der Topinambur zu den Korbblütengewächsen zählt, erfolgte die Auswahl der Herbizide im ersten Versuchsjahr analog zur vorab beschriebenen Kultur.

Auch hier trat im ersten Versuchsjahr 2005 eine starke Verunkrautung mit Kohl-Gänsedisteln (*Sonchus oleraceus*) und Ackerkratzdisteln (*Cirsium arvense*) auf. Darum wurde im Streichverfahren eine generelle Roundup-Behandlung durchgeführt. Die Silphie-Pflanzen entwickelten sich gut. Es gab nur geringe Ausfälle, die am 06.05.2005 nachgepflanzt wurden. Die einzelnen Solo-Varianten zeigten entsprechend ihrem Wirkungsspektrum eine ausreichende Wirkung, die jedoch nicht für unkrautfreie Bestände ausreichte. In Variante 4 kamen in Spritzfolge Treflan als Vorsaateinarbeitungs- und Stomp SC als Nachauflaufvariante zum Einsatz. Das Ergebnis kann als gut bis sehr gut und als durchaus praxistauglich eingeschätzt werden. Eine leichte Phytotoxizität bei Kontakt 320 SC mit Blattaufhellungen hatte sich schnell überwachsen (Tab. 42).

Tabelle 42: Wirkung und Verträglichkeit von Herbiziden in Durchwachsener Silphie, VS Dornburg 2005

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|----------------------------|--|----------|-----------|--------------|----------|----------|------------------|
| Versuch: Herbizidvergleich | | | Kultur: Silphium perfoliatum | | | | | | |
| Versuchsort: | VS Dornburg | | Versuchsbetreuer: | | | Frau Ormerod | | | |
| Sorte: | Fa. Jelitto | | Bodenart/-zahl: | | | Lehm/48 | | | |
| Vorfrucht: | Brache | | N-Düngung: | | | - | | | |
| Pflanzung: | 06.04.2005 | | Ernte: | | | - | | | |
| Variante | Anwendung | | Wirkungsgrad in % (UK = Deckungsgrad in %) | | | | | | Phytotox in % |
| | l/ha | Datum/ES | Bonitur:31.05. und 13.06.2005 | | | | | | |
| CHEAL | | | POLLA | THLAR | CABPB/SG | HERBA | GESAMT | | |
| 1 UK | - | - | 12 21 | 2 5 | 2 5 | 33 | 4 6 | 20 70 | |
| 2 Treflan | 2,0 | 05.04./VSE | 48 10 | 72 88 | 0 10 | 0 | 50 25 | | |
| 3 Kontakt 320 SC | 1,5 | 1905./ES 14 | 2 0 | 40 15 | 60 15 | | 38 60 | | 70/25 AH |
| 4 SF Treflan + Stomp SC | 2,0 3,0 | 05.04./VSE 19.05./ES 14 | 92 95 | 98 93 | 100 95 | 93 | 95 90 | | |
| 5 Gallant Super | 1,0 | 31.05./ES 20 | | | | 85 | | | |
| HERBA: GALAP, VERSS, URTUR, EUPSS | | | | | | | | | |

Ähnlich wie beim Topinambur wurde auch bei der Durchwachsenen Silphie im zweiten Versuchsjahr das Mittelspektrum auf die wirksamsten Varianten reduziert. Zusätzlich kam in al-

len Varianten eine Maschinenhacke zum Einsatz. Der Unkrautdruck war 2006 deutlich geringer. Die Wirkung von Treflan kann als gut eingeschätzt werden. Auch die Tankmischung und Spritzfolge zeigten gute bis sehr gute Wirkungsgrade und bestätigten somit die Ergebnisse vom Vorjahr. Eine Phytotoxizität war nicht festzustellen. Leichte Vergilbungen der Keimblätter resultierten aus dem kühlen Frühjahr. Die Maschinenhacke erfolgte am 12. Juni und hatte eine gute zusätzliche Wirkung, so dass die Bestände bis zum Bestandesschluss nahezu unkrautfrei gehalten werden konnten (Tab. 43).

Tabelle 43: Wirkung und Verträglichkeit von Herbiziden in Durchwachsener Silphie, VS Dornburg 2006

| | | | | | | | | | |
|---|-------------|--------------------------------------|---|-------|--------------|-------|-------|--------|------------------|
| Versuch: Herbizidvergleich | | | Kultur: Silphium perfoliatum | | | | | | Phytotox in % |
| Versuchsort: | VS Dornburg | | Versuchsbetreuer: | | Frau Ormerod | | | | |
| Sorte: | Fa. Jelitto | | Bodenart/-zahl: | | Lehm/48 | | | | |
| Vorfrucht: | Brache | | N-Düngung: | | - | | | | |
| Pflanzung: | 05.05.2006 | | Ernte: | | - | | | | |
| Variante | Anwendung | | Wirkungsgrad in % (UK = Deckungsgrad in %) Bonitur: 13.06.2006 | | | | | | |
| | l/ha | Datum/ES | POLSS | CHEAL | SOLNI | THLAR | HERBA | GESAMT | |
| LR UK + MH | | - | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 17 | - |
| 1 SF Treflan + Maschinenhacke | 2,0 | 04.05./VSE 12.06 | 84 | 93 | 91 | 89 | 66 | | 0 |
| 2 SF Treflan + Stomp SC + Maschinenhacke | 2,0 3,5 | 04.05./VSE 02.06./ES 14 12.06. | 88 | 95 | 90 | 88 | 90 | | 0 |
| 3 TM Boxer + Stomp SC + Maschinenhacke | 3,0+3,0 | 02.06./ES 14 12.06 | 70 | 88 | 90 | 90 | 90 | | 0 |
| HERBA: GALAP, VERSS, URTUR, EUPSS, FUMOF; A-RAPS; CAPBP | | | | | | | | | |

Mit den erhaltenen Versuchsergebnissen konnten auch für die Durchwachsene Silphie erste Anhaltspunkte für die Zulassung bzw. die Genehmigung der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln geschaffen werden. Keines der geprüften Mittel besitzt jedoch gegenwärtig eine Zulassung in der Kultur.

4 Ökonomische Betrachtung

Entscheidend für einen wirtschaftlichen Anbau von Biogaspflanzen sind einerseits deren Herstellungskosten bzw. deren Nutzungskosten im Vergleich zur Alternativkultur. Zusätzlich sind ggf. Unterschiede in der Methanausbeute zu beachten.

Auf Basis der Versuchsergebnisse der Parzellenversuche wurde für die aussichtsreichen Kofermentpflanzen Sudangras, Zuckerhirse und Durchwachsene Silphie eine ökonomische Erstabschätzung vorgenommen. Diese ist, aufgrund zahlreicher offener Fragen im Produktionsverfahren, für konkrete betriebswirtschaftliche Berechnungen nur eingeschränkt nutzbar. Die wesentlichen unter Praxisbedingungen zu bestätigenden Parameter für eine ökonomische Bewertung sind, neben Kosten für das Anbauverfahren, die Ertragshöhe und –stabilität, die Konservierbarkeit und die Konservierungsverluste sowie die Eignung zur Vergärung einschließlich der erreichbaren Methanausbeute.

Sudangras und Zuckerhirse

Die Kalkulation wesentlicher Parameter und Leistungen erfolgte für die Hirsearten in Anlehnung an die „Betriebswirtschaftlichen Richtwerte Silomaisproduktion“ (Degner, et al. 2007), die auf KTBL-Daten basiert, da die Produktionsverfahren relativ ähnlich sind.

Die zugrundegelegten Erträge basieren auf den durchschnittlichen Parzellenerträgen. Für Sudangras wurden dabei Erträge von 110 dt TM/ha und 140 dt TM/ha, für Zuckerhirse von 120 dt TM/ha und 160 dt TM/ha angesetzt. Die im Rahmen des Projektes auf Versuchspartellen realisierten Erträge beliefen sich für Sudangras durchschnittlich auf 130 dt TM/ha +/- 15 % und für Zuckerhirse auf 140 dt TM/ha +/- 15 %.

Die unterstellte Ertragshöhe liegt dabei für Sudangras in etwa auf dem Niveau des Praxisanbaus von Silomais, bei Zuckerhirse leicht darüber (Tab. 44).

Tabelle 44: Parameter der Sudangras- und Zuckerhirseproduktion bei unterschiedlichen Parzellenerträgen

| Nutzungsart | ME | Sudangras | | Zuckerhirse | |
|--------------------------|-----------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag |
| TM-Ertrag zur Ernte | dt/ha | 110 | 140 | 120 | 160 |
| TS-Gehalt | % | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Grünmasseeertrag, brutto | dt/ha | 367 | 467 | 400 | 533 |
| Energieverluste, total | % | 12,5 | 12,5 | 12,5 | 12,5 |
| TM-Verluste | % | 8,9 | 8,9 | 8,9 | 8,9 |
| TM-Ertrag netto | dt/ha | 100 | 128 | 109 | 146 |
| Energieertrag, netto | MJ NEL/ha | 66.413 | 84.525 | 72.450 | 96.600 |
| FM-Ertrag Futter netto | dt/ha | 334 | 425 | 365 | 486 |

In die Direktkosten gingen, neben den Saatgutkosten, Düngemittelkosten auf Basis der in den Parzellenversuchen ermittelten Nährstoffentzüge ein. Gleichzeitig ist eine Rückführung der Biogasgülle zur Düngung (50 % des entzogenen Stickstoffs) berücksichtigt. Der Berechnung der Pflanzenschutzmittel liegen die in den Versuchen erprobten Herbizide zugrunde, wobei von einer zweimaligen Applikation im Vor- und Nachauflauf ausgegangen worden ist.

Die Arbeitsgänge im Produktionsverfahren wurden, mit Ausnahme der Aussaat, weitgehend an die Silomaisproduktion angelehnt und die üblichen Verfahrensleistungen beibehalten. Gleiches gilt auch für die Festkosten, wie Gebäude-, Flächen- und sonstige Kosten, da hier keine Änderungen zu erwarten sind.

Aus den ökonomischen Abschätzungen ergeben sich in Abhängigkeit vom Ertragsniveau Herstellungskosten von 1.199 (niedriges Ertragsniveau) und 1.376 €/ha (hohes Ertragsniveau) bzw. 12,0 und 10,8 €/dt TM für Sudangras (Tab. 45). Bei Zuckerhirse belaufen sich die Kosten aufgrund des höheren Ertragspotenzials auf 1.266 und 1.491 €/ha bzw. 11,6 und 10,2 €/dt TM (Tab. 46).

Der Vergleich mit den für Silomais unter mittleren Thüringer Anbauverhältnissen kalkulierten Herstellungskosten von 1.306 und 1.408 €/ha bzw. 11,9 und 11,4 €/dt TM zeigt, dass Sudangras und Zuckerhirse nach ersten Kalkulationen zumindest hinsichtlich der Herstellungskosten mit Silomais konkurrieren können, sofern die höheren Erträge im Praxiseinsatz stabil realisierbar sind. Für eine exakte Kalkulation der Produktionskosten und vor allem der gesamten Produktionskette, einschließlich der Silierung, sind weitere Untersuchungen im Praxismaßstab erforderlich.

Tabelle 45: Richtwerte für Herstellungskosten von Sudangras bei unterschiedlichen Parzellenerträgen

| Position | | ME | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag |
|--|--|-----------------------|------------------|--------------|
| Ertrag | Trockenmasse zur Ernte | dt TM/ha | 110 | 140 |
| | Futtermittel frei Krippe bzw. Biogasanlage | dt/ha | 334 | 425 |
| Direktkosten | Saatgut | €/ha | 40 | 40 |
| | Düngemittel | €/ha | 68 | 86 |
| | Pflanzenschutzmittel | €/ha | 88 | 88 |
| | Konservierung | €/ha | 18 | 22 |
| | Summe | €/ha | 214 | 237 |
| Arbeits-erledigungskosten | Unterhaltung Maschinen | €/ha | 101 | 110 |
| | Kraft- u. Schmierstoffe | €/l 0,85 | 97 | 109 |
| | AfA Maschinen | €/ha | 155 | 167 |
| | Arbeitszeitbedarf termingebunden | AKh/ha | 10,9 | 12,9 |
| | Arbeitszeitbedarf nicht termingebunden | AKh/ha | 2,5 | 2,5 |
| | Personalkosten | 8,22 €/h Nebenk. 50 % | 165 | 190 |
| | Lohnarbeit | €/ha | 79 | 101 |
| | Summe | | 597 | 677 |
| Arbeits-erl. inkl. L+V | Summe | €/ha | 663 | 753 |
| Gebäude | Vermögen | €/ha | 3385 | 4308 |
| | Unterhaltung | €/ha | 18 | 23 |
| | AfA | €/ha | 113 | 144 |
| | Summe | €/ha | 131 | 167 |
| Flächenkosten | Pacht | €/BP 2,8 | BP 45 | 55 |
| | | | €/ha 126 | 154 |
| Sonstige | Berufsgenossenschaft | €/ha | 20 | 20 |
| | sonstiger allg. Betriebsaufwand | €/ha | 45 | 45 |
| | Summe | €/ha | 65 | 65 |
| Summe Kosten | | €/ha | 1199 | 1376 |
| dar. Arb.erl.kost. inkl. LBG o. Hilfs. | | 20,0 €/ha | 683 | 773 |
| | | €/dt FM | 3,6 | 3,2 |
| | | €/dt TM | 12,0 | 10,8 |

Tabelle 46: Richtwerte für Herstellungskosten von Zuckerhirse bei unterschiedlichen Parzellenerträgen

| Position | | ME | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag |
|--|--|----------|------------------|--------------|
| Ertrag | Trockenmasse zur Ernte | dt TM/ha | 120 | 160 |
| | Futtermittel frei Krippe bzw. Biogasanlage | dt/ha | 365 | 486 |
| Direktkosten | Saatgut | €/ha | 65 | 65 |
| | Düngemittel | €/ha | 78 | 104 |
| | Pflanzenschutzmittel | €/ha | 88 | 88 |
| | Konservierung | €/ha | 19 | 26 |
| | Summe | €/ha | 250 | 282 |
| Arbeitsleistungskosten | Unterhaltung Maschinen | €/ha | 104 | 117 |
| | Kraft- u. Schmierstoffe | €/l 0,85 | €/ha 101 | €/ha 117 |
| | AfA Maschinen | €/ha | 158 | 174 |
| | Arbeitszeitbedarf termingebunden | AKh/ha | 11,5 | 14,2 |
| | Arbeitszeitbedarf nicht termingebunden | AKh/ha | 2,5 | 2,5 |
| | Personalkosten 8,22 €/h Neben. 50 % | €/ha | 173 | 206 |
| | Lohnarbeit | €/ha | 77 | 102 |
| Summe | | | 612 | 716 |
| Arbeitsl. incl. L+V | Summe | €/ha | 681 | 799 |
| Gebäude | Vermögen | €/ha | 3692 | 4923 |
| | Unterhaltung | €/ha | 20 | 27 |
| | AfA | €/ha | 123 | 164 |
| | Summe | €/ha | 143 | 191 |
| Flächenkosten | Pacht | €/BP 2,8 | BP 45 | 55 |
| | | | €/ha 126 | 154 |
| Sonstige | Berufsgenossenschaft | €/ha | 20 | 20 |
| | sonstiger allg. Betriebsaufwand | €/ha | 45 | 45 |
| | Summe | €/ha | 65 | 65 |
| Summe Kosten | | €/ha | 1266 | 1491 |
| dar. Arb.erl.kost. inkl. LBG o. Hilfs. 20,0 €/ha | | €/ha | 701 | 819 |
| | | €/dt FM | 3,5 | 3,1 |
| | | €/dt TM | 11,6 | 10,2 |

Durchwachsene Silphie

Auch der Kalkulation wesentlicher Parameter und Leistungen für die Durchwachsene Silphie liegen die „Betriebswirtschaftlichen Richtwerte Silomaisproduktion“ zugrunde. Die Nutzungsdauer der mehrjährigen Pflanze wurde mit 12 Jahren im unteren Bereich der in der Literatur angegebenen Werte gewählt. Die Ertragshöhe von 128 dt TM/ha (mittlerer Ertrag) bzw. 147 dt TM/ha (hoher Ertrag) basiert auf den durchschnittlichen Parzellenerträgen und bewegt sich dabei im Bereich des Praxisanbaus von Silomais (Tab. 47).

Tabelle 47: Parameter der Produktion von Durchwachsener Silphie bei unterschiedlichen Parzellenerträgen

| Nutzungsart | ME | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag |
|--------------------------|-----------|------------------|--------------|
| TM-Ertrag zur Ernte | dt/ha | 128 | 147 |
| TS-Gehalt | % | 30 | 30 |
| Grünmasseeertrag, brutto | dt/ha | 428 | 489 |
| Energieverluste, total | % | 12,5 | 12,5 |
| TM-Verluste | % | 8,9 | 8,9 |
| TM-Ertrag netto | dt/ha | 117 | 134 |
| Energieertrag, netto | MJ NEL/ha | 77.481 | 88.550 |
| FM-Ertrag Futter netto | dt/ha | 390 | 446 |

In den Produktionskosten wurden von einer Pflanzung der Durchwachsenen Silphie ausgegangen. In die Direktkosten gingen die tatsächlich anfallenden Pflanzgutkosten von einmalig

3.600 €/ha ein. Gleiches gilt für die Düngemittel, die auf Basis der in den Versuchen ermittelten Nährstoffentzüge berechnet worden sind. Eine Rückführung der Biogasgülle zur Düngung (50 % des entzogenen Stickstoffs) ist analog zu den Hirsearten berücksichtigt. Die Berechnung der Pflanzenschutzmittelkosten erfolgte anhand der in den Versuchen erprobten Herbizide. Dabei ist im Anpflanzjahr eine zweimalige Applikation im Vorsaateinarbeitungsverfahren und im Nachauflauf zugrundegelegt. Ab dem 2. Standjahr ist eine Unkrautbekämpfung nicht mehr erforderlich.

Die Arbeitsgänge im Produktionsverfahren entsprechen, außer der Pflanzung, die mit 300 €/ha veranschlagt wurde, weitgehend der Silomaisproduktion, so dass die üblichen Verfahrensleistungen beibehalten wurden. Dies gilt auch für die Festkosten, wie Gebäude-, Flächen- und sonstige Kosten, da sich hier keine Änderungen ergeben.

Gemäß der ökonomischen Abschätzung ergeben sich bei einem mittleren Ertrag Herstellungskosten von 1.322 €/ha bzw. 11,30 €/dt TM und bei einem hohen Ertrag Kosten von 1.361 €/ha bzw. 10,20 €/dt TM für die Durchwachsene Silphie (Tab. 48).

Tabelle 48: Richtwerte für Herstellungskosten von Durchwachsener Silphie bei unterschiedlichen Parzellenerträgen

| Position | | ME | Mittlerer Ertrag | Hoher Ertrag |
|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------|--------------|
| Ertrag | Trockenmasse zur Ernte | dt TM/ha | 128 | 147 |
| | Futtermittel frei Krippe bzw. Biogasanlage | dt/ha | 390 | 446 |
| Direktkosten | Pflanzgut | €/ha | 300 | 300 |
| | Düngemittel | €/ha | 71 | 81 |
| | Pflanzenschutzmittel | €/ha | 5 | 5 |
| | Konservierung | €/ha | 21 | 23 |
| | Summe | €/ha | 397 | 410 |
| Arbeits-erledigungs-kosten | Unterhaltung Maschinen | €/ha | 75 | 79 |
| | Kraft- u. Schmierstoffe | €/l 0,85 | 76 | 82 |
| | AfA Maschinen | €/ha | 118 | 121 |
| | Arbeitszeitbedarf termingebunden | AKh/ha | 9,9 | |
| | Arbeitszeitbedarf nicht termingebunden | AKh/ha | 2,5 | 2,5 |
| | Personalkosten | 8,22 €/h Nebenk. 50 % | 153 | |
| | Lohnarbeit | €/ha | 97 | 109 |
| | Summe | | 520 | 557 |
| Arbeits-erl. incl. L+V | Summe | €/ha | 581 | 557 |
| Gebäude | Vermögen | €/ha | 3949 | 4513 |
| | Unterhaltung | €/ha | 21 | 24 |
| | AfA | €/ha | 132 | 150 |
| | Summe | €/ha | 153 | 175 |
| Flächenkosten | Pacht | €/BP 2,8 | BP | 45 |
| | | | €/ha | 126 |
| Sonstige | Berufsgenossenschaft | €/ha | 20 | 20 |
| | sonstiger allg. Betriebsaufwand | €/ha | 45 | 45 |
| | Summe | €/ha | 65 | 65 |
| Summe Kosten | | €/ha | 1322 | 1361 |
| | dar. Arb.erl.kost. | €/ha | 601 | 577 |
| | inkl. LBG o. Hilfs. 20,0 €/ha | €/dt | 3,4 | 3,1 |
| | | €/dt TM | 11,3 | 10,2 |

Bei Betrachtung der Kostenabschätzung ist zu berücksichtigen, dass es im Produktionsverfahren Durchwachsene Silphie noch deutliche Optimierungsmöglichkeiten gibt. Beispielsweise könnten durch eine Direktsaat die Anlagekosten erheblich reduziert werden.

5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

In Auswertung der Anbau-, Silier- und Gärversuche kann festgestellt werden, dass die Methanproduktion je Flächeneinheit nahezu parallel zu den Biomasseerträgen verläuft. Erwartungsgemäß verfügt jeder Standort mit seinen klimatischen und bodenspezifischen Besonderheiten über ein unterschiedliches Ertragsniveau und eine unterschiedliche Eignung für den Anbau der verschiedenen Pflanzenarten.

An allen vier Versuchsstandorten wurden die Maissorten „Doge“ und „PR38F53“ als Vergleichspflanzen angebaut. Am **Lößstandort Dornburg** erreichte die erstmalig 2005 beerntete Durchwachsene Silphie zusammen mit dem Mais „Doge“ die besten Methanerträge. Die Maissorte „PR38F53“, Topinamburkraut im mehrjährigen Anbau, Luzernegras zu Blühbeginn und in der Vollblüte, Sudangras und die Zuckerhirsen „Super Sile 18“ und „Super Sile 20“ erreichten ebenfalls hohe Methanausbeuten und -erträge.

Die Zuckerhirsen „Super Sile 15“ und „Friggo“, die Topinamburknollen sowie das Kraut des einjährig kultivierten Topinamburs erzielten dagegen zu niedrige Methanausbeuten bzw. Methanerträge, um als Koferment in Biogasanlagen wirtschaftlich eingesetzt werden zu können. Eine Alternative zur Steigerung der Methanerträge bei Topinambur wäre, Kraut und Knolle gemeinsam zu silieren und einzusetzen, dabei bereitet aber die Verschmutzung der Knolle und deren geringe TS bei der Silierung im technischen und technologischen Prozess im Reaktor große Probleme.

Die theoretisch möglichen Methanausbeuten der aus den genannten Pflanzenarten gewonnenen Silagen unterschieden sich teilweise beträchtlich vom unsilierten Pflanzenmaterial. Wenig Abweichung war bei Luzerne zu Blühbeginn und zur Vollblüte, Durchwachsener Silphie, Zuckerhirse „Super Sile 18“ und den beiden Maissorten zu verzeichnen. Negativ wirkte sich die Silierung auf die Methanwerte der Zuckerhirsesorten „Super Sile 15“, „Super Sile 20“ und „Friggo“ sowie des Topinamburkrauts im ein- und mehrjährigen Anbau aus. Positiv wirkte der Umsetzungsprozess dagegen bei Topinamburknollen.

Die Ergebnisse der der Praxis nachempfundenen Batchversuche waren mit den theoretisch berechneten Werten weitgehend vergleichbar. In den Batchversuchen lag der Methananstieg im Vergleich zu reiner Rindergülle bei Sudangras höher als bei der Maissorte „Doge“. Sudangras und die beiden Maissorten erreichten gute Ergebnisse. Wie bereits bei den theoretischen Berechnungen der Methanausbeuten der Silagen festgestellt wurde, ist die Zuckerhirse „Super Sile 20“ nur bedingt, die Zuckerhirse „Friggo“ und Topinamburkraut im einjährigen Anbau nicht für den Einsatz als Koferment zu empfehlen.

Die mit mehrjährigem Topinamburkraut, Durchwachsener Silphie und Luzernegras durchgeführten kontinuierlichen Versuche zeigten, dass nach 60 Tagen Versuchsdauer noch kein stabiler Zustand vorlag. Die Methanausbeuten waren bis dahin bei den drei Arten in etwa gleich.

Am **Vorgebirgsstandort Heßberg** erreichte der mehrjährig angebaute Topinambur (Krautnutzung), insbesondere im zweiten und dritten Anbaujahr, außerordentlich hohe Erträge und übertraf im Methanertrag alle anderen Pflanzenarten. Auch die Durchwachsene Silphie wies in Heßberg ähnlich gute Ergebnisse wie am Standort Dornburg auf. An dem kühleren Standort war der Silomais „PR38F53“ dem Energiemais „Doge“ in allen Kriterien weit überlegen. Klee-gras, zu Blühbeginn beerntet, und in günstigen Jahren das wärmeliebende Sudangras erzielten gute Erträge.

In **Müllheim in der Rheinebene** übertraf der Mais alle anderen Pflanzenarten. Auch Sudangras und Zuckerhirse erreichten hohe Erträge, die allerdings großen jahresbedingten Schwankungen unterlagen. Klee-gras, Topinambur und wahrscheinlich auch die Durchwachsene Silphie, die nach der Pflanzung einging, scheinen für diesen Standort als Kofermentpflanzen ungeeignet zu sein.

Die Erträge an dem kühlen, trockenen **Vorgebirgsstandort Burkersdorf** lagen aufgrund der niedrigen Bodenwertzahlen erwartungsgemäß auf niedrigerem Niveau als in den anderen Versuchsstationen. Hier könnten, neben Mais, frühe massewüchsige Hirsesorten und Luzerne-gras als Koferment in Betracht kommen.

Alle im Projekt geprüften Pflanzenarten lassen sich problemlos mit der für die Maisernte üblichen Technik ernten. In den Versuchen kam dazu bei Durchwachsener Silphie, Topinamburkraut und den Hirsearten ein Maishäcksler mit reihenungebundenem Schneidwerk (Kemperschneidwerk) zum Einsatz, für die Ernte von Luzerne- bzw. Klee-gras ein üblicher Futterernter.

Bei dem zweijährig an drei Standorten durchgeführten **Versuch zum Vergleich von Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung** nach Landsberger Gemenge und Winterfutterroggen traten deutliche Unterschiede zwischen den Jahren und Standorten auf. Im Mittel der durchgeführten Versuche übertraf der Mais das Sudangras bezüglich der Ertragshöhe. Es ist jedoch zu beachten, dass der Versuch jeweils einheitlich zur Silomaisreife beerntet wurde und das Sudangras zu diesem Zeitpunkt in der Regel die Erntereife noch nicht erreicht hatte. Insgesamt reichen die vorliegenden Ergebnisse für eine abschließende Wertung noch nicht aus.

In Auswertung der **Versuche zum Einfluss von Temperatur und Niederschlag** auf die Entwicklung von Ertrag und TS-Gehalt bei Mais und Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung ist festzustellen, dass sich die Erträge beider Fruchtarten nahezu parallel zueinander entwickeln. In den Versuchsjahren erreichten Mais und Sudangras sowohl in Haupt- als auch in Zweitfruchtstellung annähernd gleiche Erträge. Interessant war, dass das Sudangras den für eine sichere Silierung erforderlichen TS-Gehalt etwa zum gleichen Zeitpunkt erreichte wie der Mais. Im Gegensatz zum Silomais behielt das Sudangras diesen Wert über nahezu sechs Wochen bis Ende Oktober bei. Bei Bestätigung der Ergebnisse in weiteren Versuchen könnten durch den Anbau von Sudangras die Erntezeitspanne deutlich verlängert und somit die Arbeitsspitzen bei der Silomaisernte abgebaut werden.

Auf Basis der durchgeführten **Versuche zur Wirkung und Verträglichkeit von Herbiziden** in Durchwachsener Silphie und Topinambur ist es möglich, vorläufige Empfehlungen für die Zulassung bzw. die Genehmigung der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu geben. Die

Versuchsergebnisse bilden gleichzeitig die Grundlage für die Entwicklung praxistauglicher Anbauverfahren.

Im Ergebnis einer ersten **ökonomischen Abschätzung** ist festzustellen, dass Sudangras und Zuckerhirse bezüglich der Herstellungskosten mit Silomais konkurrieren können, sofern sich in der Praxis die etwas höheren Biomasseerträge stabil realisieren lassen. Gleiches gilt auch für die Durchwachsene Silphie, bei der das Verfahren der Bestandesetablierung entscheidenden Einfluss auf die Produktionskosten hat. Wenn es gelingt, durch Direktsaat in der Praxis ausgeglichene Bestände zu ermöglichen, sinken die Herstellungskosten deutlich ab. Für eine exakte Kalkulation der Produktionskosten und vor allem des gesamten Produktionsprozesses, einschließlich der Silierung, sind weitere Untersuchungen im Praxismaßstab erforderlich.

Generell ist einzuschätzen, dass von den untersuchten Fruchtarten vor allem die Hirsearten und auch die Durchwachsene Silphie gute Chancen für einen Anbau als Koferment in Biogasanlagen haben. Gleichzeitig gilt es hier jedoch, offene Fragen hinsichtlich Anbau und Erstverarbeitung zu klären, um eine sichere Einführung in die landwirtschaftliche Praxis zu gewährleisten.

6 Literatur

DLG-Futterwerttabelle, DLG-Verlags-GmbH, Eschborner Landstrasse 122, 60489 Frankfurt am Main, 1997

Handreichung Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe „Biogasgewinnung und –nutzung“, Gülzow, 2005

Forschungsbericht W. Neumerkel, B. Martin, Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) - eine neue Futterpflanze, Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde Berlin 26 (1982) 4, S. 261-271

Dissertation W. Neumerkel, Botanik, Anbau und Futterwert der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg